

# KAUPUNKIMALLI JA MALLINNUS FOTOGRAMMETRISIN KEINOIN

Selvitys Kalajoen kaupungille

Niko Haaranieniemi

Opinnäytetyö  
Maanmittaustekniikka  
Insinööri (AMK)

2016

Tekniikan- ja liikenteen ala  
Maanmittaustekniikka  
Insinööri (AMK)

---

<b>Tekijä</b>	Niko Haaranieni	<b>Vuosi</b>	2016
<b>Ohjaaja(t)</b>	Jaakko Lampinen		
<b>Toimeksiantaja</b>	Kalajoen kaupunki		
<b>Työn nimi</b>	Kaupunkimalli ja mallinnus fotogrammetrisin keinoin		
<b>Sivu- ja liitesivumäärä</b>	55 + 2		

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä selvitystä Kalajoen kaupungille kaupunkimallinnuksesta. Työ jakautuu kahteen osaan, jonka ensimmäisessä osassa otetaan selvää kaupunkimalleista ja mallinnuksen keinoista sekä niihin liittyvistä olennaisista tekijöistä, kuten tiedonsiirtoformaateista ja kaupunkimallinnuksen hyödyistä. Työssä pohditaan myös, kuinka Kalajoki voisi mallintaa omaa kaupunkiaan ja hyödyntää sitä.

Työn toisessa osassa tutustutaan kaupunkimallin geometrian kartoittamiseen UAV-ortokopterilla ja tuottamiseen Agisoft Photoscan Professional-ohjelmalla. Lennokilla kuvattiin ja ohjelmistolla mallinnettiin Kalajoentien noin kilometrin mittainen osa ympäristöineen.

Opinnäytetyön teoriaan tietopohja kerättiin pääosin kirjallisuustutkimuksella. Lennokin ja ohjelmistojen käyttöön saatiin myös hieman käyttökoulutusta. Suurin osa ohjelmistojen käyttöön liittyvistä tiedoista haettiin internetistä ohjelmiston tuottajan sivuilta ja keskustelufoorumeilta sekä käyttäjämanuaaleista.

Opinnäytetyössä selvisi, että kaupunkimalli voi olla pelkän keskeisten kaupunkikohteiden geometrian esityksen lisäksi ominaisuustietoa sisältävä semanttinen kaupunkitietomalli. Kaupunkimallinnusta voidaan hyödyntää monin eri tavoin. Avoimia tiedonsiirtoformaatteja käyttämällä saadaan kaupunkimallista eniten hyötyjä. Kalajoen kaupungilla on hyvät mahdollisuudet hankekohtaisten kaupunkimallien tekemiseen.

UAV-ortokopteri ja fotogrammetrinen mallinnus Agisoft Photoscan Professionalilla osoittautui hyväksi mallinnusmenetelmäksi pienille alueille, joilla ei ole runsaasti kasvillisuutta keskeisten kohteiden tiellä mallinnusta haittaamassa. Sää ja kohteiden heijastavuus vaikuttavat merkittävästi tuotoksen laatuun.

Avainsanat  
Muita tietoja

Agisoft Photoscan, kaupunkimalli, UAV  
Työssä valmistunut malli Kalajoentiestä on linkissä:  
<https://sketchfab.com/models/71604bc9e98444018ec83f5abee09ef6/embed>

Technology, Communication and  
Transport  
Degree Programme in Land Survey-  
ing

<b>Author</b>	Niko Haaranieni	<b>Year</b>	2016
<b>Supervisor</b>	Jaakko Lampinen		
<b>Commissioned by</b>	Town of Kalajoki		
<b>Subject of thesis</b>	City Model and Modelling with Methods of Photo- grammetry		
<b>Number of pages</b>	55 + 2		

The objective of this Bachelor's thesis was to study city modelling for a town of Kalajoki. The purpose was to explain what city modelling is and what the benefits of the modelling are, how Kalajoki could practice city modelling and benefit from it. In addition, it was also studied how the geometry of the town is gathered with a cartography drone and how it was modelled with methods of auto-mated photogrammetry.

The theory base of this thesis was gathered by doing a literature research. The used modelling software was Agisoft Photoscan Professional. Some training was received for using of the drone and the modelling programs. The main part of knowledge for software use was gathered from the software manuals and web sites and forums of the producers.

The results showed that a city model is a virtual 3D-model of an urban area which can consist of the geometric and the visual features but also of the semantic data of the objects. The benefits of the city modelling are numerous. Using open standard data formats gives the most advantage for all users of the city model. Kalajoki has good tools and possibilities to create city models for single projects. The drone and photogrammetric modelling with Agisoft Photoscan proved out to be a good method for small areas where there are not much vegetation blocking the sight of the urban objects. The weather and the reflectiveness of the objects affect the quality of the model significantly.

**Key words** Agisoft Photoscan, city model, drone, UAV  
**Special remarks** The model of the street Kalajoentie is available at:  
[https://sketchfab.com/mod-  
els/71604bc9e98444018ec83f5abee09ef6/embed/](https://sketchfab.com/models/71604bc9e98444018ec83f5abee09ef6/embed/)

# SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	9
2 KAUPUNKIMALLI JA KAUPUNKIMALLINNUS .....	11
2.1 Semanttinen kaupunkitietomalli .....	11
2.2 Rakentamisen tietomallit.....	12
2.3 Julkaistuja vaatimuksia ja ohjeita .....	13
2.4 Kaupunkimallin hyödyt ja käyttötarkoitukset .....	14
2.4.1 Auringonsäteilyn voimakkuuden arvioiminen .....	17
2.4.2 Meluanalyysit .....	18
2.4.3 Näkyvyysanalyysit .....	18
2.5 Avoimet formaatit ja niiden merkitys .....	19
2.5.1 CityGML standardi kaupunkitietomallille.....	20
2.5.2 IFC, LandXML ja Inframodel .....	22
2.6 Tietojen kerääminen .....	23
2.6.1 Kantakartta.....	24
2.6.2 BIM-mallien kerääminen.....	24
2.6.3 Laserkeilaus .....	25
2.6.4 Fotogrammetria ja kuvilta mallinnus.....	26
2.7 Yhteenveto.....	28
2.8 Kalajoen aineistot ja työkalut .....	29
3 KALAJOENTIEN ILMAKUVAUS JA MALLINNUS .....	31
3.1 UAV-lennokki ja ohjelmistot .....	31
3.1.1 Agisoft Photoscan Professional.....	31
3.1.2 GeoDrone X4L -ortokopteri .....	33
3.2 Ilmakuvaus- ja mallinnustyön vaiheet .....	34
3.2.1 Maastotyöt ja valmistelu .....	34
3.2.2 Kuvauslento ja sen suunnittelu.....	35
3.2.3 Mallinnus Agisoft Photoscan Professional -ohjelmistolla.....	36
3.2.4 Työssä kohdattuja ongelmia ja niiden ratkaisuja .....	40
4 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	44
4.1 Kalajoen suunta kohti kaupunkimallinnusta .....	44
4.2 Kalajoentien mallinnus .....	45
5 POHDINTA.....	47

Tekniikan- ja liikenteen ala  
Maanmittaustekniikan  
koulutusohjelma

---

LÄHTEET .....	50
LIITTEET .....	55

## ALKUSANAT

Tahdo kiittää Kalajoen kaupunkia, joka mahdollisti tämän päättötyön teon. Erityisesti kiitän Kalajoen kaupungin maanmittausteknikko Ari Matkaselkää ja paikkatietoinsinööri Esa Taka-Eilolaa, jotka toimivat päättötyöni mentoreina. Kiitän veljeäni Jere Haaraniemelle tehokkaan tietokoneen lainasta ja tehdyistä aputehtävistä. Tahdon kiittää myös avopuolisoani Jenni Hussaa oikoluvusta.

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ASPRS	(American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) on tieteellinen yhdistys, jonka tavoitteena on edistää fotogrammetrian ja kaukokartoituksen teknologioita ja käyttöä. (ASPRS 2016a)
BIM	(Building Information Model) on englanninkielinen lyhenne rakennuksen tietomallille.
CityGML	on avoin kaupunkimallistandardi tiedon tallentamiseen ja siirtoon, joka pohjautuu XML kieleen (Hyttinen 2015, 9-12).
GNSS	(Global Navigation Satellite System) on maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä, joka koostuu muun muassa amerikkalaisesta GPS- ja venäläisestä Glonass-satelliittijärjestelmistä. (Laurila 2012b, XIX)
IFC	(Industry Foundation Classes) on avoin tiedonsiirtoformaatti rakennus ja taitorakenteiden tietomalleille.
InfraBIM	on englanninkielinen lyhenne rakennetun ympäristön tietomallille, joka sisältää inframallin lisäksi siihen liittyvien rakenteiden ja ympäristön tietoja (Serén 2014,7).
KAAPO	"Kaupunki- ja kuntakeskustat pohjoisessa" on hanke, joka kohdistuu Pohjois-Pohjanmaan taajamien kehittämiseen (KAAPO 2014, 1).

LAS	On yleinen tiedostoformaatti pistepilviaineistoille (ASPRS 2016b).
LIDAR data	(Light Detection and Ranging) on laserkeilauksella tuotettu pistepilvi, joka voidaan luokitella standardeilla määriteltäviin pisteluokkiin, kuten rakennuksiin ja maanpinnan pisteisiin.
LOD	(Level of detail) on tarkoittaa yleisesti 3D-mallinnuksessa 3D-mallin tarkkuustasoa. CityGML kaupunkimallistandardi määrittelee viisi eri LOD-tasoa (LOD0-LOD4).
UAV	(Unmanned Aerial Vehicle) miehittämätön ilma-alus. Maanmittausalalla UAV-lennokkeja käytetään ilmakuvauksen ja laserkeilauksen tehtävissä.
Verkko-RTK-mittaus	RTK-mittaus (Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus) on satelliittipaikannukseen perustuva liikkuva suhteellinen mittaustapa, jolla saavutetaan senttimetriluokan mittaustarkkuus. Verkko-RTK-mittaus on RTK-mittausta mittaustarkkuutta parantavaa tukiasemaverkkoa hyväksi käyttäen. (Laurila 2014b, XXI.)
XML	(Extensible Markup Language) on ohjelmitoista ja laitteista riippumaton datan tallennukseen ja siirtoon kehitetty formaatti (Hyttinen 2015, 5).



## 1 JOHDANTO

Kolmiulotteisten tietomallien käyttö yleistyy maailmalla. Ennen 2000-lukua kaupunkimallinnus oli kallista, manuaalista ja työlästä puuhastelua. Vuosituhannen vaihtumisen jälkeen kaupunkimallinnus alkoi kehittyä kiihtyvää vauhtia muun muassa mittaus- ja kartoitustekniikan, tiedonsiirtomenetelmien, automaattisten rakennusmallintimien ja tiedonsiirtostandardien kehityttyä. Eurooppalaisista kaupungeista kaupunkimallia ovat alkaneet ylläpitää muun muassa Bryssel, Pariisi ja Berliini. (Suomisto 2014, 10.) Suomessa tehdään parhaillaan selvitystä eurooppalaiseen kaupunkimallinnukseen vaikuttaneen avoimen kaupunkimallistandardin, CityGML:n soveltuvuudesta Suomen kansalliseksi standardiksi (Savisalo 2015, 23). Infra-rakentamisen puolella on Suomessa tietomallipohjaisia hankkeita pilotoitu jo useita hyvin kokemuksin (Salmi 2015, 4). Oulun kaupunki hoitaa jo kaikki infrahankkeensa tietomallien pohjalta (Salminen 2015, 14).

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tehdä selvitystä Kalajoen kaupungille mitä kaupunkimallinnus on, selventää käsitteistöä ja pohtia Kalajoen mahdollisuuksia kaupunkimallintamisessa ja sen hyödyntämisessä. Lisäksi tutustutaan kaupunkiympäristön geometrian mallinnukseen fotogrammetrisin menetelmin. Työssä kokeillaan, miten UAV-ortokopterilla ilmakuvattua aineistoa saadaan mallinnettua. Mallinnuskohteena käytetään Kalajoentien osaa, joka sijoittuu Kalajoen keskusta. Mallinnus tehtiin Agisoft Photoscan Professional ohjelmistolla.

Samantapaisia fotogrammetriaan perustuvia mallinnuksia on tehty muun muassa Baltimoressa, Yhdysvalloissa sijaitsevassa Marylandin yliopistossa. Työssä ilmakuvattiin ja mallinnettiin Marylandin kampusalue itsetehdyllä UAV-kopterilla (Liite 1), mallinnus hoidettiin tässäkin työssä Agisoft Photoscan Professional ohjelmistolla (Gienow 2014). Malli on katseltavissa osoitteessa: <https://sketchfab.com/models/733719d35b564814a8e3269b268c2637/embed>.

Aiheen valintaan vaikutti sen ajankohtaisuus ja oma mielenkiintoni siihen. Mallinnus etenkin rakennusalalla näyttää tekevän kovasti tuloaan ja onkin jo käytössä. Havaitsin myös, että maanmittausinsinöörillä voi olla rooli niin hankekohtaisen rakennustietomallin, kuin 3D-kaupunkimallin käytön monessa eri vaiheessa.

Näitä ovat ainakin nykytilan kartoittaminen, tietomallien käyttö mittauksissa työmaalla, 3D-paikkatiedon analysointi ja käyttö sekä toteutuneen hankeen kartointus. Lisäksi aihe herätti mielenkiintoa Kalajoen kaupungin maankäyttöpalveluiden henkilökunnassa, mikä mahdollisti työn toteutuksen Kalajoelle.

Kalajoki on 12 700 asukkaan merenrantakaupunki Pohjois-Pohjanmaalla. Tämä yritysvetoinen kaupunki tunnetaan hyvin suositusta matkailukeskuksestaan Hiekasärkistä. (Kalajoen kaupunki 2016.)

## 2 KAUPUNKIMALLI JA KAUPUNKIMALLINNUS

3D-kaupunkimalli on yksinkertaisimmillaan kolmiulotteinen malli, jolla voidaan esittää kaupungin eri kohteita, kuten rakennuksia, maanpinnan muotoja, infrastruktuuria ja kasvillisuutta (Lammi 2015, 2). Kaupunkimalli nähdään kumminkin entistä enemmän kaupungin topografisena tietokantana, eli semanttisena kaupunkimallina (Savisalo 2015, 19). Tässä työssä sanalla kaupunkimalli tarkoitetaan kolmiulotteista mallia kaupunkikohteista yleisesti. Mikäli työssä tarkoitetaan jotain tietyn luonteista kaupunkimallia, kuten semanttista kaupunkimallia, tarkennetaan käsitettä erikseen.

### 2.1 Semanttinen kaupunkitietomalli

Semanttinen kaupunkimalli sisältää geometrian ja visuaalisuuden lisäksi kaupungin keskeisten kohteiden luokittelun, niiden temaattiset ja tilalliset ominaisuudet sekä tietoa kohteiden suhteista toisiinsa. Semanttisuus mahdollistaa erilaisten kyselyiden, analyysien ja simulaatioiden suorittamisen mallille. (Erving 2008, 4; Savisalo 2015, 19.) Esimerkiksi semanttisesta kaupunkimallista voidaan hakea kyselyin rakennuksia, jotka ovat rakennettu tietyssä vuotena, niiden käyttötarkoituksen mukaan tai vaikka niiden geometrinen ominaisuus, kuten huoneiden määrän mukaan. Mallista voi saada esiin myös muunlaista tietosisältöä, kuten rakennuslupia koskevia tietoja (Savisalo 2015, 5).

Semanttisen kaupunkimallin avoin standardi CityGML on vaikuttanut Euroopan kaupunkimallinnuksen kehitykseen merkittävästi. Standardi onkin otettu kansalliseksi standardiksi muun muassa Saksassa ja Hollannissa, jotka jo käyttävät ja ylläpitävät isoimpien kaupunkiensä kaupunkimalleja. (Savisalo 2015, 23.)

Nähdään, että tulevaisuudessa on kuntien ja kaupunkien vastuu ylläpitää omaa kaupunkimallia ja jakaa mallin tietoja avoimesti yritysten ja kuntalaisten käyttöön erilaisten rajapintojen kautta. Näin kaupunkimalli toisi hyötyjä eniten kaikille osapuolille. (Holopainen 2015, 4, 22–25; Savisalo 2015, 14, 32.) Nykyään Suomen kuntien kaupunkimallinnus on yleisemmin hankekohtaista. Malleja hyödynnetään eniten visioinnin, vuorovaikutuksen, suunnittelun ja päätöksenteon sovellutuksissa. Kuntaliiton tekemän kyselyn mukaan, suurimmalla osalla 40:stä kyselyyn

vastanneesta kunnasta oli jo jonkinlainen kokemus kaupunkimallinnuksesta. Vain neljä kuntaa oli täysin kokemattomia mallinnuksessa. Kyselyyn 44 vastanneiden asiantuntijoiden mukaan kaupunkimalli nähdään tulevaisuudessa kunnan kanta-karttana. (KM3D-hanke 2014, 1–3, 19–20.)

FCG:n järjestämässä ”Kaupunkien tietomallinnus” -koulutuksessa 28.10.2015 Helsingissä todettiin, että kaupunkimallintamisessa on meneillään nyt eräänlainen hypevaihe. Erilaisia kaupunkimallinnuksen toimintaratkaisuja ilmestyy kuin sienä sateella. Tekniikka kehittyy nopeasti, mutta toimintatavat ja prosessit mu-kautuvat niihin hitaammin. Aika näyttää, mitkä tavat ja ratkaisut jäävät yleiseen käyttöön. (Hytinen 2015, 27; Savisalo 2015, 14–17; Soukki 2015, 22, 24–25.)

## 2.2 Rakentamisen tietomallit

Rakennusalalla tietomallikäsite tarkoittaa infrakohteen rakennus- tai taitoraken-nuskohteen semanttista mallia, joka sisältää koko rakennusprosessin elinkaaren aikaiset tiedot. Tietomallin tarkoituksena on koota kaikki tarvittava tieto yhteen malliin, jotta tiedon hyödyntäminen olisi projektissa mahdollisimman helppoa. Kerran tallennettu tieto on hyödynnettävissä koko projektin elinkaaren ajan aina suunnittelusta ylläpitoon saakka. (RIL 2016.)

Talorakennuksen tietomallista käytetään nimityksenä yleisesti englanninkielistä lyhennystä BIM (Buildin Information Model) (Kuvio 4). Infrakohteen tietomallia kutsutaan inframalliksi. Hankekohtaista rakennetun ympäristön tietomallia kutsu-taan InfraBIM-malliksi, se sisältää inframalleja sekä BIM-malleja. (Serén 2014, 7.)

Suomessa infra-alalla tietomallintaminen on yleistymässä kovaa vauhtia. Tieto-mallintamista on testattu kymmenissä eri pilottiprojekteissa (Salmi 2015, 4). Isot kaupungit ja rakennusalan firmat ovat jo omaksumassa tietomallien käyttöä omiin prosesseihinsa (Salmi 2015, 4). Esimerkiksi Oulun kaupunki suunnittelee ja ra-kentaa jo kaupungin kaikki infrahankkeet tietomallien avulla (Salminen 2015, 14).

InfraBIM-malli on omanlaisensa semanttinen kaupunkimalli. Kaupunkimallin ja rakentamisen tietomallit voidaan erottaa kumminkin niiden kohteiden kuvausta-van mukaan. Rakentamisen tietomallit keskittyvät kuvaamaan, kuinka kohde

suunnitellaan ja rakennetaan, kun taas kaupunkimalli kuvaa kohteitaan niiden käytön ja havainnoinnin perspektiivistä (Gröger & Plümerin 2012, 25).

### 2.3 Julkaistuja, vaatimuksia ja ohjeita

Kaupunkimallinnuksesta ja InfraBIM tietomallinnuksesta on laadittu ohjeistusta. Tämän työn kannalta on tarpeellista mainita myös niistä.

Oskari Liukkosen ”Kuntien paikkatiedon polku kanta-kartasta 3D-kaupunkimalliin” tekemässä diplomityössä on laadittu ohjeet, kuinka Suomen kuntien tulisi siirtyä kaksiulotteisesta paikkatiedosta CityGML-standardiin perustuvaan kaupunkimalliin. Diplomityö on osa kuntaliiton ja BuildingSMARTin 3D-kaupunkimallihanketta. Ohjeistuksen tavoitteena on neuvoa kuntia kaupunkimallinnuksen polulle, siten että kehitys olisi kestävä ja kannattava pitkällä tähtäimellä. Liukkonen jakaa ohjeistuksensa neljään eri vaiheeseen, jotka kuntien tulisi ottaa huomioon kaupunkimallinnukseen siirtyessä. (Liukkonen 2015, 62.) Vaiheet ovat:

1. 3D-kaupunkimallitietotaidon hankinta
2. 3D-kaupunkimallinnustarpeiden kartoitus ja käyttötapauksien määrittely
3. 3D-kaupunkimallin rakenteen ja tiedonsiirron määrittäminen käyttötapauksien asettamien ominaisuus-, tarkkuustaso-, ja laatuvaatimusten perusteella.
4. 3D-kaupunkimallin tuotanto-, ylläpito-, validointi- ja hallinnointiprosessien suunnittelu käyttötapauksien 3D-kaupunkimallille asettamien vaatimusten perusteella. (Liukkonen 2015, 62.)

Vastikään on myös laadittu Yleiset Inframallivaatimukset YIV2015. Tämänkin takana on BuildingSMART Finland. (Salmi 2015, 4.) YIV2015:n tarkoitus on muun muassa yhdenmukaistaa, ohjata ja kehittää infra-alan mallinnuskäytäntöjä. Vaatimuksissa määritellään esimerkiksi käytettävät tiedostoformaatit. (Liukas & Kemppainen 2015, 4, 8.)

BuildingSMART Finland on tietomallintamisen yhteistyöfoorumi, joka koostuu muun muassa kiinteistö- ja infra-alan omistajista ja palveluntuottajista. Foorumin tarkoitus on tukea tietomallipohjaisten prosessien käyttöönottoa ja levittää tietoa tietomallintamisesta. (buildingSMART Finland 2016.) BuildingSMART Finland on osa kansainvälistä buildingSMART organisaatiota (BuildingSMART Nordic 2016), joka muun muassa kehittää tietomallintamisen standardeja (BuildingSMART Finland 2016).

## 2.4 Kaupunkimallin hyödyt ja käyttötarkoitukset

3D-kaupunkimallin hyötyjä ovat sen visuaalisuus ja konkreettisuus. Ne tuovat nopeutta päätöksentekoon ja helpottavat kaupungin kehityksen visiointia sekä suunnittelua. Semanttisen kaupunkimallin tietosisältö nopeuttaa ja tehostaa kaupungin toimintoja sekä parantaa laatua suunnittelussa. Tämä tuo säästöjä kaupungille. Tila- ja aikaulottuvuudet ovat paremmin havaittavissa kaupunkimallissa verrattuna kaksiulotteiseen aineistoon. (Liukkonen 2015, 64.)

Taulukko 1. Kaupunkimallin käyttötarkoituksia, joissa visualisointi ei ole pääroolissa tai välttämätön (Biljecki 2015, 2851).

<u>Visualisoimattomat käyttötarkoitukset:</u>	<u>Esimerkki käyttösovellutuksesta:</u>
1. Auringon säteilyn määrän arviointi	Rakennuksen katon soveltuvuuden määrittely Aurinkopaneelien asennukseen
2. Energian tarpeen arviointi	Jälkikäteän arvioitava rakennuksen energian paluu
3. Avustettu paikannus	Sijainnin määrittely kartalta
4. Lattiatilan määrittely	Rakennusten arviointi
5. Rakennustyyppien luokittelu	Semanttisten datasettien rikastus

Visuaalisuuden käyttö on ollut suurin hyödyke aikaisemmissa 3D-kaupunkimalleissa. Tekniikan kehittyessä ja semantiikan tulon myötä kaupunkimallien käyttötarkoitukset ovat kumminkin lisääntyneet eri käyttöaloilla yli pelkän visualisoinnin, silti visualisointi on erottamaton osa kaupunkimalliin liittyvissä työvaiheissa, kuten taulukoista 1 ja 2 voidaan nähdä, visualisoinnin sovelluksia on paljon enemmän. Suurin osa kaupunkimallien käyttötarkoituksista nojautuu nykyisin mallin raken-

nuksiin ja monet käyttötarkoitukset eivät hyödynnä muita temaattisia luokkia, kuten kasvillisuutta tai siltoja ollenkaan. On odotettavissa, että tulevaisuudessa muidenkin temaattisten luokkien käyttö kasvaa. (Biljecki, Stoter, Ledoux, Zlatanova & Coltekin 2015, 2843, 2862–2863.)

Taulukoissa 1 ja 2 Biljecki ja kumppanit jakavat tutkimuksessaan ”Applications of 3D City Models: State of the Art Review” 3D-kaupunkimallin nykyään käytetyt hyödynnyskeinot kahteen ryhmään. Ryhmään, jossa visualisoidaan jotain asiaa kaupunkimallin avulla (Taulukko 2) ja ryhmään jossa kaupunkimallia ei hyödynnetä visualisointi mielessä (Taulukko 1). Taulukot käsittävät siis tämän hetkiset kaupunkimallin käyttö- ja hyödynnystavat riippumatta kaupunkimallin luonteesta. Seuraavissa kappaleissa on perehdytty ja selvitetty tarkemmin muutamia kaupunkimallin käyttötarkoituksia ja hyödynnyskohteita.

Taulukko 2. Visualisoinnin käyttötarkoituksia kaupunkimallinnuksessa (Biljecki ym. 2015, 2851).

<b>Visualisoinnin käyttötarkoitukset:</b>	<b>Esimerkki:</b>
1. Geovisualisointi ja visuaalisuuden kohennus	Lentosimulaatio
2. Näkyvyys analyysit	Optimaalisen paikan etsiminen valvontakameralle
3. Varjoanalyysit	Uuden rakennuksen aiheuttamien varjojen arviointi
4. Melun etenemisen arviointi kaupunkiympäristössä	Liikennesuunnittelu
6. 3D kiinteistötieto	maaomaisuuden rekisteröinti
7. Navigaation visualisointi	Navigaatiot
8. Kaupunkisuunnittelu	Viheralueiden suunnittelu
9. Visualisointia kaupunki-informaatioiden kommunikaatioihin kaupunkilaisille	Virtuaaliset kaupunkikiierrokset vuorovaikutusta varten
10. Auringon valon suunnan ymmärtäminen	kohteiden tunnistaminen
11. SAR kuvien ymmärtäminen	Tutkakuvan tulkinta
12. Puitteiden hallinta	Tilanhallinta lentokentällä
13. Automaattinen rakennustelineiden asennus	Rakennustekniikka
14. Häätätilanteen visualisointi	Evakuoinnin suunnittelu
15. Valaistuksen simulointi	Maamerkkien valaistusten suunnittelu
16. Radioaaltojen eteneminen	Radioinfran optimointi
17. Laskennallinen nesteiden dynamiikka	Ilman laadun ennustaminen
18. Väestömäärän arviointi alueella	Kriisinhallinta
19. Reititys	Saavutettavuuden arviointi
20. Seismisten vahinkojen ennustus	Vakuutus
21. Tulvien visualisointi	Riskien hallinta
22. Muutosten selvittäminen	Rakennusvalvonta
23. Tilavuuden tiheys tutkimukset	Kaupunkitutkimukset
24. Metsän hallinta	Puiden kasvun ennustus
25. Arkeologia	Muinaisten jäännösten visualisointi

Suomennos lähteestä: Biljecki, F. Stoter, J. Ledoux, H. Zlatanova, S & Çöltekin, A 2015. Applications of 3D City Models: State of the Art Review. ISPRS Journal of Geo-Information 4, 2842-2889.



### 2.4.1 Auringonsäteilyn voimakkuuden arvioiminen

Hyvä esimerkki visualisoimattomasta mallin hyödyntämisestä on taulukon 1 ensimmäisen kohdan auringonsäteilyn voimakkuuden arvioiminen (Kuvio 1). Tätä analyysiä voidaan hyödyntää esimerkiksi aurinkopaneelien hankinnan arvioimisessa (Biljecki ym. 2015, 2850). Onko aurinkoa tarpeeksi ja kuinka paljon aurinkoenergiaa on saatavilla? Kaupunkisuunnittelussa asuinalueita voidaan suunnitella sellaisille alueille ja siten, että auringonsäteily on maksimoitu. Tällä voidaan taata parhaat aurinkoenergian hyödynnysmahdollisuudet. Auringonsäteilyn voimakkuuden analysointia voidaan hyödyntää myös tulevan rakennuksen valaistuksen ja mahdollisen auringonpaisteesta johtuvan rakennuksen ylikuumentumisen ennakointiin. (Biljecki ym. 2015, 2852, 2850.)

Auringonsäteilyn määrää voidaan visualisoida, mutta se ei ole välttämätöntä päämäärän saavuttamiseksi (Biljecki ym. 2015, 2848–2849). Kuvion 1 tapauksessa auringonsäteilyn määrän analysoimisessa on otettu huomioon myös säteilyä vastaanottavan pinnan materiaali ja ympäristön kasvillisuus, joka saattaa olla auringonsäteiden esteenä (Biljecki ym. 2015, 2852).



Kuvio 1. Auringon säteilyn määrän analysoiminen tietyssä ajankohtana (Biljecki ym. 2015, 2852)

#### 2.4.2 Meluanalyysit

Kaupunkimallin käyttö meluanalyyseissa lisääntyi Euroopassa EU:n ympäristömeludirektiivin jälkeen. Direktiivi vaatii EU-maiden järjestelmällistä melukarttojen tuottamista tiedottaakseen kansalaisille melulle altistumisesta ja sen vaikutuksista. (Biljecki ym. 2015, 2856.) Meluanalyyseilla voidaan ennakoida meluhaittoja ja minimoida niitä (Suomisto 2013, 17). Meluanalyyseillä voidaan selvittää esimerkiksi, mihin paikkoihin tulisi rakentaa meluesteitä. Kaupunkimalli on kaksiulotteista paikkatietoaineistoa käytännöllisempi analyysissä, sillä melutasot voivat vaihdella merkittävästi eri korkeuksilla samalla tasokoordinaatilla. Kaupunkikohteet, kuten rakennukset luovat erikorkuisia ja kokoisia meluesteitä. (Biljecki ym. 2015, 2856.)

Meluanalyyseissä kaupunkimallin semanttisuus ei ole välttämätön, mutta siitä on hyötyä. Kaupunkimallin kohteiden ominaisuustieto voi parantaa analyysin tulosta, kun tiedetään millä tavalla kohde estää äänen kulkemista esimerkiksi kohteen tietyn materiaalin johdosta. (Biljecki ym. 2015, 2856.)

#### 2.4.3 Näkyvyysanalyysit

Kaupunkimallin avulla voidaan ottaa selvää, miten tietty piste tai kohde näkyy minnekin. Näkyvyysanalyysit ovat hyödyllisiä kaupunkikuvatarkasteluissa, korkeiden rakenteiden näkyvyystarkasteluissa ja turvallisuusanalyyseissä. (Suomisto 2013, 11.) Turvallisuusanalyyseissä näkyvyyttä voidaan myös arvioida esimerkiksi autotien turvallisuuden kannalta tai valvontakameroiden paikkojen määrittämisen kannalta (Biljecki ym. 2015, 2854). Jos näkyvyysanalyysiin lisää liikkeen, voidaan tutkia myös aikaulottuvuuksia ja selvittää esimerkiksi, kuinka kauan kohde on tietyllä reitillä nähtävissä (Suomisto 2013, 11). Näköala-analyyseillä voidaan arvioida asunnon hintaa olettaen, että ikkunasta näkyvä maisema vaikuttaa asunnon arvoon (Biljecki ym. 2015, 2854).

Hyvä esimerkki mallista, jossa voidaan tutkia asunnon näköaloja on Blom kartan ja Sightlinen toimittama 3D-malli Oslon Grefsen Stationin uudisrakennuskohteesta. Mallissa voidaan tarkastella rakennusten sisätilojen lisäksi ikkunoista ja parvekkeilta näkyvää kaupunkiympäristöä (Kuvio 2) (3D

mallinnus uuden asuinalueen suunnittelussa 2014). Näin mahdollinen uusi asukas saa paremman käsityksen esimerkiksi siitä, miten muut ympäröivät rakennukset vaikuttavat huoneiston valaistukseen ja maisemaan. Tällaisten sisätilamallien ja rakennusten ympäristön yhdistelmämallien käytön uskotaan yleistyvän tulevaisuudessa (Biljecki ym. 2015, 2863).



Kuvio 2. Grefsen Station sisä-/ulkotilamalli (3D mallinnus uuden asuinalueen suunnittelussa 2014)

## 2.5 Avoimet formaatit ja niiden merkitys

Jotta kaupunkimallista hyötyisivät kaikki osapuolet mahdollisimman paljon, tulisi olla standardoituja menetelmiä tiedon siirtoon ja varastointiin. Muuten mallista hyötyy ainoastaan mallin ensisijainen tekijä tai tilaaja ja sen jakaminen muille tai siihen aineiston lisääminen muista malleista on hankalaa (Erving 2008, 5). Kaupunkimallilla on vaara jäädä hankekohtaiseksi ja sen ylläpitäminen voi tuottaa vaikeuksia. Standardointi on edellytys kaupunkimallin kustannustehokkaalle ylläpidolle mahdollistaessaan saman tiedon uudelleen käytön eri sovellutuksien aloilla (Gröger, Kolbe, Nagel & Häfele 2012, ix).

Kun tieto on samassa muodossa kaikilla, sitä voidaan liikutella osapuolilta toisille vaivattomasti. Standardointi helpottaa erilaisten aineistojen ja ohjelmistojen yhteiskäytön (Erving 2008, 4). Yhtenäiset tiedostoformaatit parantavat tiedon säilymisaikaa ja monikäyttöisyyttä. Se tekee myös suunnittelutyöstä tehokkaampaa ja antaa yksityiskohtaisempaa tietoa sisällöstä. (Liukas & Kemppainen 2015, 8.)

Seuraavassa kahdessa kappaleessa käydään läpi oleelliset formaatit, jotka on hyvä tietää kaupunki- ja infratietomallinnuksesta. Tarkemmin käydään läpi kaupunkimallinnuksen CityGML-formaattia, koska se on vaikuttanut kaupunkimallinnuksen kehitykseen Euroopassa merkittävästi ja se on tarkemmin osa tämän päättöyön aihetta (Savisalo 2015, 23). Mainitut infra-, taito- ja talomallinnuksen formaatit sisältyvät myös YIV2015-vaatimuksiin.

### 2.5.1 CityGML standardi kaupunkitietomallille

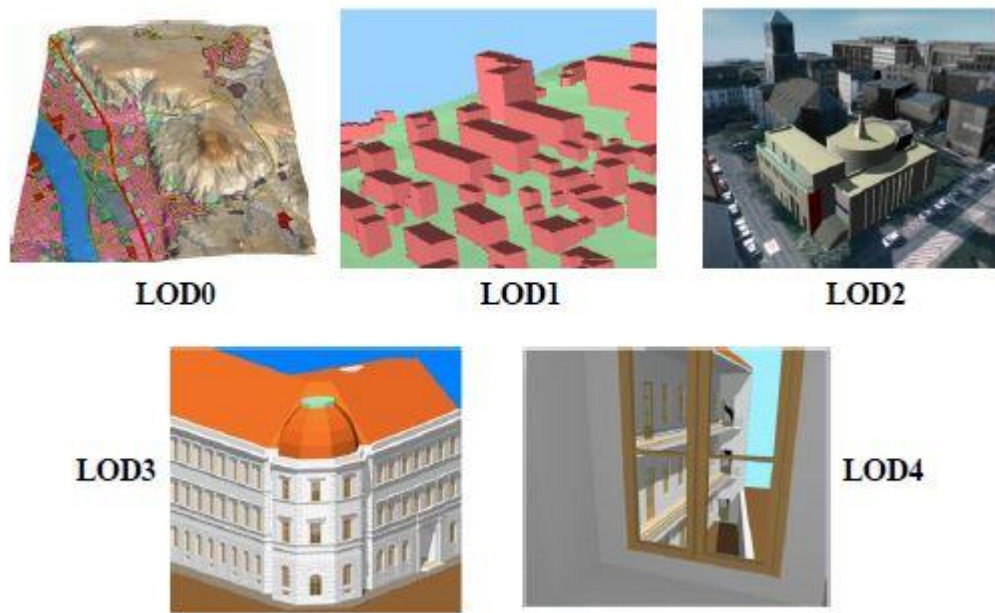
CityGML on XML-kieleen perustuva avoin standardi tietomalliformaatti, jonka tarkoituksena on luoda yleiset määritteet 3D kaupunkimallille. Kaupungin graafisten ominaisuuksien esittämisen lisäksi CityGML on suunniteltu esittämään erityisesti kaupunkikohteiden semanttisten ja temaattisten ominaisuuksien luokittelun ja yhdistelyn. (Gröger, ym. 2012, xi, 9.)

Nykypäivänä suunnitteluohjelmistot eivät vielä tue laajasti CityGML formaattia. Se on kumminkin päätetty ottaa esimerkiksi Hollannissa ja Saksassa kaupunkimallinnuksen kansalliseksi standardiksi. Selvitystä CityGML:n soveltuvuudesta Suomen standardiksi tekee BuildingSMART Finlandin kaupunkisuunnittelun toimialaryhmä. (Savisalo 2015, 23.) Hollannissa tehdyn kaupunkimallinnuspilotin mukaan selvisi myös, että CityGML on vielä liian yleispätevä standardi, joten maassa tehtiin sen rinnalle oma kansallinen IMGeo-standardi (Liukkonen 2015, 59–60). IMGeo-standardi toteutettiin CityGML:lle ominaisella ADE-laajennuksella (Liukkonen 2015, 59). ADE-laajennukset (Application Domain Extension) mahdollistavat CityGML:n käyttäjän räätälöidä uusia ominaisuuksia kaupunkimallilleen tarpeensa mukaan (Gröger ym. 2012, 16).

CityGML sisältää siis geometrisen ja temaattisen mallin. Formaatin geometrinen malli määrittelee johdonmukaisesti ja yhtenäisesti kohteiden geometriset ja topologiset ominaisuudet kaupunkimallissa. Vuorostaan temaattinen malli työstää

geometrista mallia erilaisiin temaattisiin luokkiin/kenttiin, kuten esimerkiksi maastomalleiksi, rakennuksiksi ja rakenteiksi (talot, sillat, tunnelit, ym.), kasvillisuudeksi, maankäytölliseksi, vesialueiksi ja kaupunkikalusteiksi. Mallin kohteille voidaan linkittää ulkoisia lähteitä erilaisista tietokannoista, joista kohteen tiedot ovat peräisin tai, jotka sisältävät jotain muuta lisätietoa. Esimerkiksi kaupunkimallin rakennuksella voi olla viite kiinteistötietojärjestelmään, josta omistajan ja osoitteen tiedot on hankittu. (Gröger ym. 2012, xi, 9, 13.)

CityGML formaatille on ominaista mallin tarkkuustasoajattelu ja ideana on, että mallissa voitaisiin tarkastella eri tarkkuudella eri kohteita yhtä aikaa. Puhutaan LOD-tasoista (Level of detail). Tarkkuustasoja standardi tunnistaa viisi LOD0–LOD4 (Kuvio 3). LOD0-taso on kaksi ja puoliulotteinen maastomalli, jossa rakennukset voidaan esittää kolmiulotteisen maastomallin päällä kattoreunojen tai ulkoseinien 2D-monikulmioviivoina. LOD1-tasossa rakennukset esiintyvät kolmiulotteisena ulkoreunojensa muotoisina laatikkomaisina ja tasakattoisina massamalleina maastomallin päällä, kun taas LOD2-tasossa rakennusten kattojen muodot ovat tarkempia ja yksilöllisiä ja niiden rajapinnat ovat temaattisesti eriytettyjä. LOD3 on tarkka tarkkuustaso, jossa esiintyy rakennuksen yksilöllinen arkkitehtuurinen ulkokuori seinä- ja kattopintoineen. Viimeisessä ja tarkimassa tasossa, LOD4-tasossa päästään tarkan ulkorakenteen lisäksi myös rakennuksen sisälle. Tässä tasossa esiintyy tarkasti rakennuksen sisärakenne, ovet, portaat ja esimerkiksi kalusteet. Jokaiselle LOD-tasolle voidaan kohteisiin liittää tekstuuria esimerkiksi orto- ja viistokuvista. (Gröger ym. 2012, 11.)



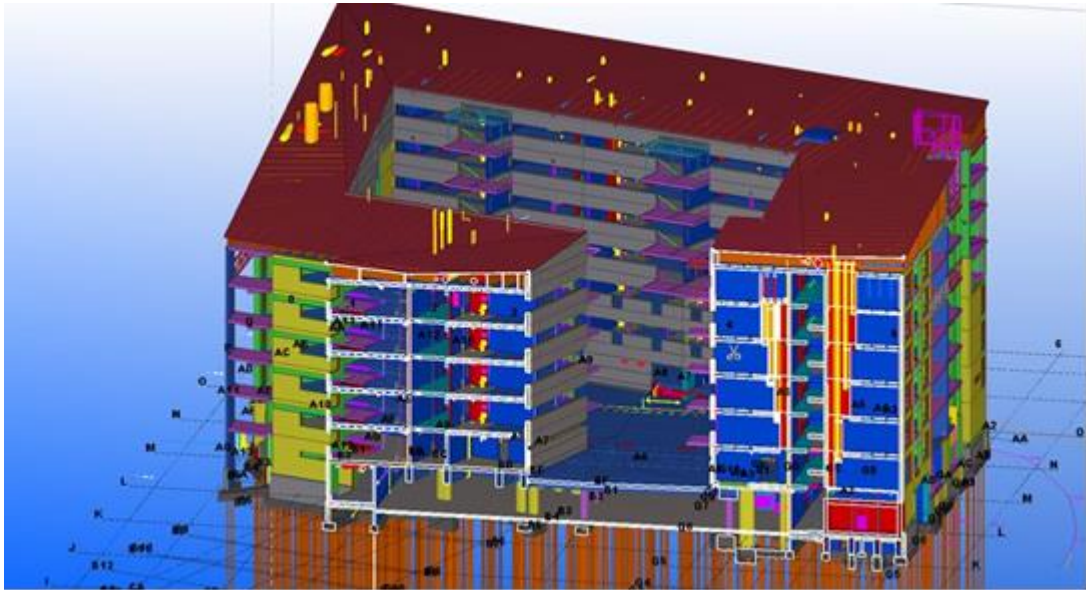
Kuvio 3. CityGML:n LOD-tasot (Gröger ym. 2012, 11)

CityGML formaatilla pystytään liittämään kohteisiin myös ilmiöitä tai ominaisuuksia, kuten melusaasteisuutta tai infrapunasäteilyä. Standardissa ilmiöt ovat liitettyinä jokaiseen pintageometrian kohteeseen ns. pintatietoon yhtenä tietona. Yhdellä pinnalla voi olla tietoa monista eri ilmiöistä. Samoin monista pinnoista koostuva geometrinen kohde voi sisältää monia eri ilmiötietoja. Pintatietueen arvot voivat olla vakaita muuttumattomia arvoja tai ne voivat olla riippuvaisia pinnan tietystä sijainnista mallissa. Ilmiöitä voidaan liittää, joka tarkkuustasolle. (Gröger ym. 2012, 33–34.)

### 2.5.2 IFC, LandXML ja Inframodel

LandXML on Infra- ja katusuunnittelun tietomallien avoin tiedonsiirtoformaatti. Se mahdollistaa suunnittelun ja ajantasaistiedon ohella mallin hyödyntämisen muun muassa koneohjauksessa. Formaatin on määrä yhdistyä IFC- ja GML-formaatteihin ja sitä ei enää kehitetä aktiivisesti eteenpäin. Suomessa LandXML- formaattiin on kehitetty IM (Inframodel) laajennus (nykyinen versio IM3), jota tukevat kaikki alan suunnitteluohjelmat. (Hytinen 2015, 18; Savisalo 2015, 25.) Inframodel 4 versio on nykyään kehitteillä (InfraBIM 2016).





Kuvio 4. BIM/IFC-malli Helsingin Kalasataman Kotikorttelista (Tekla 2012)

IFC on taito- ja talorakennusten tietomallien, kuten siltojen ja kerrostalojen avoin tiedonsiirron ISO-standardi (Kuvio 4). Kaikki yleisesti käytössä olevat CAD-ohjelmistot tukevat tätä formaattia. (Savisalo 2015, 24.) IFC formaatti on mahdollista kirjoittaa CityGML muotoon LOD4-tasoiseksi malliksi (Liukkonen 2015, 45).

## 2.6 Tietojen kerääminen

Kaupunkimallinnuksella käsitetään kokonaisuudessaan kaupunkiympäristön tietosisältöjen järjestäytynyttä keräämistä, hallinnointia ja mallin hyödyntämistä (Savisalo 2015, 4). Suomalaisten asiantuntijoiden mielestä kaupunkimallinnus ja ylläpito voisi perustua kantakarttaan, UAV-valokuvauksella suoritettuihin kuvauksiin sekä rakennusten IFC-mallien keräämiseen rakennuslupaprosessien yhteydessä (Liukkonen 2015, 49).

Kaupunkimallin käyttötarkoitus määrittää mallin tarkkuustason ja käytettävän tiedonkeruumenetelmän (Liukkonen 2015, 69). Jotta kaupunkimallin tuotanto ja ylläpito olisi taloudellisesti kannattavaa ja kestävä, pitäisi kaupunkimallia pystyä tuottamaan vähintään puoliautomaattisesti (Dölner, Kolbe, Liecke, Sgouros & Teichmann 2006, 2). Tässä kappaleessa mainitaan yleisiä tapoja, jolla voidaan kerätä tietoa kaupunkimalliin.

### 2.6.1 Kantakartta

Kaupunkien ja kuntien kantakartta soveltuu CityGML standardin mukaisiin LOD0–LOD2-tarkkuustasoiisiin kaupunkimallinnuksiin. LOD2-tasoinen mallinnus on mahdollista, mikäli kantakartta sisältää rakennuksen kattojen harjan ja räystäiden korkeustiedot. Kantakartta voi toimia myös mallin semanttisen tiedon lähteenä. Kantakartta voi sisältää ominaisuustietona esimerkiksi rakennusten osoitteen ja kerrosluvun sekä luokittelun käyttötarkoituksiensa mukaan. (Liukkonen 2015, 70–72.)

Kantakartta perustuu laserkeilausaineistoista ja ortoilmakuvista vektoroituun aineistoon. Karttaa ylläpidetään jatkuvasti ortokuvien ja laserkeilausaineistojen lisäksi perinteisillä maastomittauksilla, joita ovat GNSS- ja täkymetrimittaukset. Kantakartta sisältää muun muassa kunnan rakennukset, tiestön, johtotiedot ja kiinteistötiedot. Kantakartan erityismuoto, kaavan pohjakarttaa on lainsäädännön mukaan käytettävä asemakaavan ja erillisen tonttijaon laatimisessa (JUHTA 2014, 2). Pohjakartasta on laadittu JHS suositus: ”JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen”, jossa kaavan pohjakartalle määritellään vaatimukset (JUHTA 2014, 2).

Vaikka kantakartasta ei saada LOD3- tai LOD4-tason kaupunkimalliaineistoa, se on silti hyvä lähtöaineisto kaupunkimallille sen ajantasaisuuden ja ominaisuustietojen takia. Useimmat käyttökohteet eivät vaadi LOD2-tasoa tarkempaa mallinnusta (Liukkonen 2015, 67). LOD2-tarkkuustaso on nykyään yleisin Euroopassa käytetty tarkkuustaso ja sillä voidaan tehdä keskeisimmät melu-, varjostus- ja energia-analyytit. Teksturoituna tämä taso on myös riittävä useimpiin visualisointin tarkoituksiin. (Suomisto 2013, 8.)

### 2.6.2 BIM-mallien kerääminen

Suomalaisten asiantuntijoiden mukaan kaupunkimallin ylläpidon rakennusten osalta voisi hoitaa muun muassa rakennuslupaprosessin kautta kerättävien rakennusten IFC-malleilla (Kuvio 4). Jotta tämä onnistuisi, tulisi kaupungin tai kun-

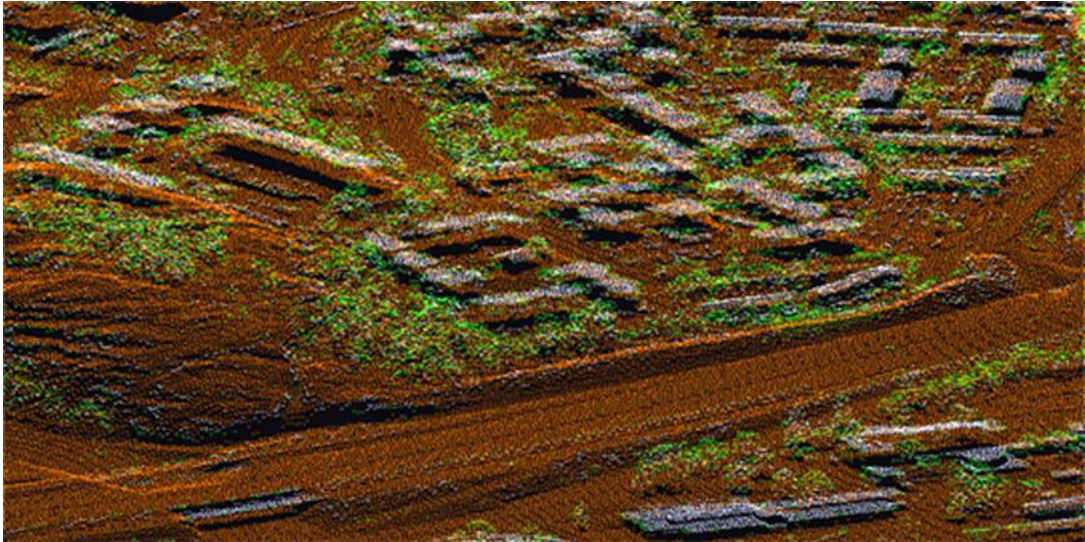


nan rakennuslupaprosessiin tehdä muutoksia. Hyvä puoli IFC-mallien hankinnassa olisi sen takaama oikein tarkka CityGML-standardin LOD4-tarkkuustason aineisto, jolla on semantiikkaa. (Liukkonen 2015, 70.)

### 2.6.3 Laserkeilaus

Jos kaupunkimallin käyttötarkoitus vaatii yksityiskohtaisten geometrioiden esittämistä, on laserkeilaus sopiva vaihtoehto mallinnukselle (Liukkonen 2015, 70). Laserkeilauksen sovelluksilla saadaan mallinnettua esimerkiksi rakennusten ulko- ja sisätilat tarkasti. Ongelmana joissain tilanteissa pidetään sitä, että laserkeilauksen tuotos ei kerro, mitä seinien sisällä tai maan alla on. Laserkeilauksen tuotokseen voidaan lisätä valokuvia, jolloin mallin ulkoasu saadaan fotorealistiseksi (Laurila 2012a, 14).

Laserkeilaukset voidaan jaotella mittaus- ja laitetekniikoidensa perusteella ilmalaserkeilaukseksi, mobiilikeilaukseksi sekä maa- ja teollisuuslaserkeilaukseksi (Laurila 2012a, 2). Jokaisella laserkeilaimella on omat käyttötarkoituksensa ja vahvuutensa. Lentokoneella ilmasta suoritettavat keilaukset soveltuvat laajojen alueiden tiedon keräämiseen (Kuvio 5). Liikkuvalla mobiilikeilaimella tai UAV-lennokkiin kiinnitetyllä keilaimella saadaan rakennusten julkisivuista tarkempaa tietoa pieneltä alueelta. Maa- ja teollisuuslaserkeilaimilla voidaan puolestaan kerätä rakennusten ulkopuolisen tiedon lisäksi tietoja sisätilojen mallintamiseen.



Kuvio 5. Ilmalaserkeilauksella tuotettu ja luokiteltu pistepilvi (Maanmittauslaitos 2016)

Laserkeilaimen tiedonkeruu perustuu nopeaan etäisyyksien ja suuntien mittaukseen sähkömagneettista säteilyä havaitsemalla (Laurila a2012, 4). Laserkeilain havaitsee näkyvän valon, lähi-infran ja ultraviolettin aallonpituuksia (Rönholm & Haggrén 2004 ). Keilaimesta lähetetään laserpulsseja, jotka kimpoavat takaisin kohteesta. Kohteen etäisyys lasketaan laserpulssin kulkuajan perusteella. Samalla paluusignaalista mitataan sen intensiteetti. Tuloksena saadaan pistepilvi, jonka jokaisella pisteellä on koordinaatit ja intensiteettiarvo (Laurila a2012, 2–4; Laurila b2012 269–270.)

#### 2.6.4 Fotogrammetria ja kuvilta mallinnus

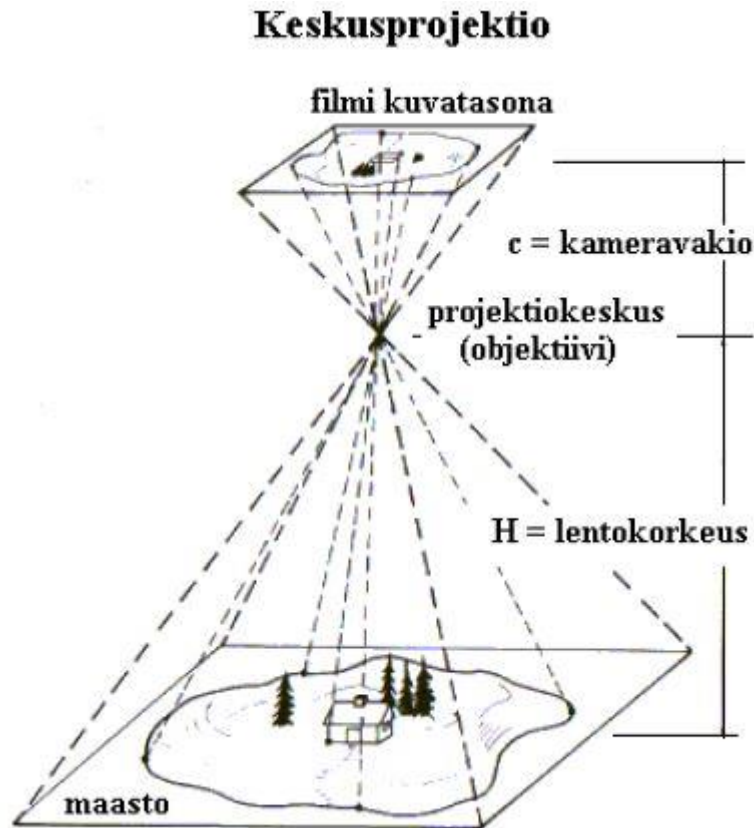
Mallinnusta voidaan tehdä myös valokuvilta fotogrammetrisilla menetelmillä. Fotogrammetria on kaukokartoituksen erityisalue, jossa mitataan valokuvan geometrisiä piirteitä. Sen keinoilla määritetään kohteiden sijaintia, kokoa ja muotoa kuvilta (Laurila 2008, 1). Esimerkkejä tällaisesta mallinnuksesta ovat Blom karttojen viistokuvilta mallinnettu Tukholman kaupunki (Liite 2) (Tukholma kehityy kolmiulotteisena 2013) ja johdannossakin mainittu Gienowin UAV-kopterilla kuvattu Marylandin yliopistokampus (Liite 1).

Yksinkertaisesti selitettynä kuvilta mallinnuksessa kohde kuvataan monesta suunnasta, sitten kuville tehdään keskinäinen orientointi, jolloin kuvat ovat samassa koordinaatistossa. Kohteen taso- ja korkeuskoordinaatit lasketaan mittaamalla eri kuvilta saman pisteen vastinpisteitä. Malli voidaan georeferoida, eli sen maantieteellinen sijainti voidaan määrittää halutussa koordinaatistossa esimerkiksi mitattujen tukipisteiden avulla. Täten malli on myös mittatarkka.(Erving 2008, 6.)

Kaupunkikohteen valokuvausta voidaan suorittaa esimerkiksi UAV-ilmakuvauslennokilla tai lentokoneella. Yksittäisiä pieniä kohteita, kuten rakennuksia voidaan kuvata myös maasta käsin edellyttäen, että koko rakennus saadaan kuvattua ympäriinsä. Fotogrammetrian menetelmillä mallinnetuista malleista saadaan fotorealistisia (Erving 2008, 6). Kun tekstuuri on muodostettu valokuvista, se lisää mallin realistisuutta ja tietosisältöä (Erving 2008, 6).

Pääperiaate fotogrammetrisessä mallinnuksessa on, että mallinnettava kohde esiintyy vähintään kahdessa eri paikasta otetussa kuvassa. Yksinkertaisia geometrisia kohteita pystytään mallintamaan myös yhdeltä kuvalta. Fotogrammetrian menetelmillä mallinnusta kuvilta kutsutaan fotogrammetriseksi rekonstruktioksi. Fotogrammetrinen rekonstruktio on tehtävä, jossa perspektiivikuvasta määritetään kohteen kolmiulotteiset muodot. (Laurila 2008, 7; Laurila 2015, 6.)

Valokuva on kohteen keskusprojektio, geometrian termein perspektiivikuva. Se tarkoittaa sitä, että kaikki kuvaussäteet kulkevat saman projektiokeskuksen kautta kuvatasolle (Kuvio 6). Tällöin kohteen piste maastossa, projektiokeskus ja kohteen kuvapiste kuvassa ovat samalla linjalla. Sitä hyödyntäen kuvilta voidaan rekonstruoida kolmiulotteinen muoto. Perspektiivikuva voidaan tehdä kohteesta valokuvauksen lisäksi piirtämällä tai laskemalla.(Laurila 2008, 6–7;Laurila 2015, 6.)



Kuvio 6. Keskusprojektio (Laurila 2008, 6)

Digitaaliset kuvat mahdollistavat fotogrammetrisen rekonstruktion suorittamisen automaattisesti tietokoneohjelmilla (Laurila 2015, 29). Esimerkiksi Agisoft Photoscan Professional on tällainen ohjelmisto. Myös yksittäisestä kuvasta rekonstruointiin on kehitetty työkaluja piirto-ohjelmiin. Muun muassa Sketchup-ohjelmistosta löytyy tällainen työkalu (Trimble Navigation Ltd 2016).

## 2.7 Yhteenveto

Kaupunkimallin tulisi siis olla semanttinen tietomalli, joka toimisi tulevaisuudessa kaupungin kantakarttana. Kaupunkimalli pitäisi tuottaa avoimia tiedonsiirtoformaatteja käyttäen ainakin puoliautomaattisesti, jotta sen ylläpito ja käyttäminen olisi kustannustehokasta. CityGML-standardi on kaupunkimallinnuksen vahvasti yleistyvä tiedonsiirtoformaatti, joka on otettu monessa Euroopan maassa kansalliseksi standardiksi ja on pohdinnan alla myös Suomessa. Se ei kokemusten perusteella yksistään riitä kansalliseksi standardiksi, vaan vaatii tarkemman kansallisiin tarpeisiin räätälöidyn standardin vierelleen.

Kaupunkimallin konkreettisuuden ja visuaalisuuden ansiosta kaupunkimallista on helpompi hahmottaa esitettäviä asioita verrattuna 2D-karttaan. Semanttisuuden myötä voidaan kaupunkimallia hyödyntää myös ilman välttämätöntä visualisointia. Kaupunkimallia voidaan hyödyntää muun muassa vuorovaikutuksessa, analyyseissa ja suunnittelussa.

Kaupunkimallinnuksen lähtöaineistona, tiedonkeruumenetelmänä ja tarkkuustasona käytetään sopivinta kaupunkimallin tarkoitusperää palvelevaa ratkaisua. Kantakartasta on mahdollista saada CityGML standardin LOD2-tasoista kaupunkimallia, mikäli se sisältää rakennusten kattomuotojen korkeustiedot. LOD2-tarkkuustaso on tällä hetkellä yleisin tarkkuustaso ja se palvelee useimpia kaupunkimallin käyttötarkoituksia hyvin.

Tietomalliajattelun lisääntyessä suunnittelussa ja rakentamisessa sekä ylläpidossa, kasvanee kysyntä myös ajantasaiselle kaupunkimallille. Kaikkea lähtöaineistoa ei tarvitsisi hankekohtaiseen malliin mitata, mikäli on olemassa tietokanta, joka sisältää kaupungin olennaisimmat tiedot kolmiulotteisessa muodossa.

## 2.8 Kalajoen aineistot ja työkalut

Kalajoella on monenlaista materiaalia kaupunkimallinnukseen jo valmiina. Kaupungin ylläpidetyistä aineistoista, kuten kaavan pohjakartasta, johtokartoista ja ortokuvista saadaan mallinnettua muun muassa maaston muodot, rakennukset ja viemäri- ja vesijohtoverkostot. Ortokuvista maastomalliin saa lisättyä fotorealistiset tekstuurit (Kuvio 7).

Kalajoen kaavan pohjakartta sisältää rakennuksien osalta niiden seinä- tai räystäslinjat. Rakennusten käyttötarkoitus selviää CAD-tason nimestä, jolle rakennus on piirretty. Osalla rakennuksista on myös korkeustieto. Tämä tarkoittaa sitä, että aineistosta saadaan ainakin LOD1- tarkkuustasoa vastaavaa mallia (Kuvio 7).





Kuvio 7. LOD1-tasoa vastaavaa mallinnusta Kalajoesta Infracore -ohjelmistolla

Kaupungille on vasta hankittu Autodeskin Infrastructure Design Suite ohjelmistopaketti. Ohjelmistopaketti sisältää muun muassa Infracore 360 LT ohjelmiston, jolla voidaan tehdä realistisia kaupunkimalleja monenlaisista tietolähteistä nopeasti (Autodesk Inc 2016). Aineiston tietolähteinä voidaan käyttää esimerkiksi laserkeilausaineistoa tai pohjakarttaa. Ohjelma lukee avoimia tietomalliformaatteja kuten IFC ja CityGML-formaatteja. Ohjelmalta onnistuu myös erilaiset analyysit, simuloinnit ja kyselyt. (Autodesk Inc 2016.) Edellä mainitussa tuotepaketissä on myös muita 3D-mallinnusohjelmia, joilla on omat vahvuusominaisuutensa esimerkiksi tarkempien yksityiskohtien mallintamisessa.

### 3 KALAJOENTIEN ILMAKUVAUS JA MALLINNUS

Kalajoentien mallinnuksen tarkoituksena oli, että Kalajoen keskustasta mallinnetaan noin kilometrin pituinen tien osa ympäristöineen UAV-lennokilla ilmakuvattua aineistoa hyväksikäyttäen. Mallin leveys tiestä määräytyi työn aikana, kun saatiin parempi käsitys UAV-lennokin ominaisuuksista. Työssä tuotettua materiaalia on tarkoitus käyttää Kalajoen keskustataajaman ideointiin ja suunnitteluun sekä kaupungin kartastojen täydentämiseen. Työn tekemiseen saatiin rahoitusta Pohjois-Pohjanmaan taajamien kehittämiseen kohdistuvalta KAAPPO-hankkeelta.

Kalajoentien ilmakuvaukseen ja mallinnukseen suoritettiin GeoDrone X4L UAV-ortokopterilla ja Agisoft Photoscan Professional ohjelmistolla. Ortokopteri ja sen järjestelmät olivat vuokrattuja laitteita. Photoscan mallinnusohjelmistosta käytettiin 30 päivän ilmaista kokeilu-aikaa. Tukipisteiden mittauksessa käytettiin Leican Viva GS 14 GNSS-mittalaitetta (Kuvio 10). Seuraavissa kappaleissa käydään läpi mallinnuksen ja ilmakuvauksen vaiheet sekä niissä käytettyjen ohjelmien ja lennokin ominaisuuksia. Kappaleessa käsitellään myös joitakin ongelmia, mitä työn aikana tuli vastaan.

#### 3.1 UAV-lennokki ja ohjelmistot

##### 3.1.1 Agisoft Photoscan Professional

Venäläisen Agisoft LCC:n valmistama Agisoft Photoscan Professional on ammatikäyttöön tarkoitettu valokuvaan perustuvan 3D-mallinnuksen ohjelmisto. Sen tekniikka perustuu monikuvakulmaiseen 3D-rekonstruktioon, joka mahdollistaa kohteen mallinnuksen valokuvista. Kohteen valokuvat voidaan ottaa mistä suunnasta tahansa, kunhan kohde on näkyvillä vähintään kahdessa kuvassa. Mallinnuksen laatuun vaikuttavat muun muassa kuvapeitto, kuvien laatu sekä kohteen pinnan ominaisuudet, kuten heijastavuus. Photoscanilla saadaan tuotettua 3D-mallin lisäksi pistepilvi, ortokuva ja fotorealistiset tekstuurit mallille. (Agisoft LCC 2015, V.)

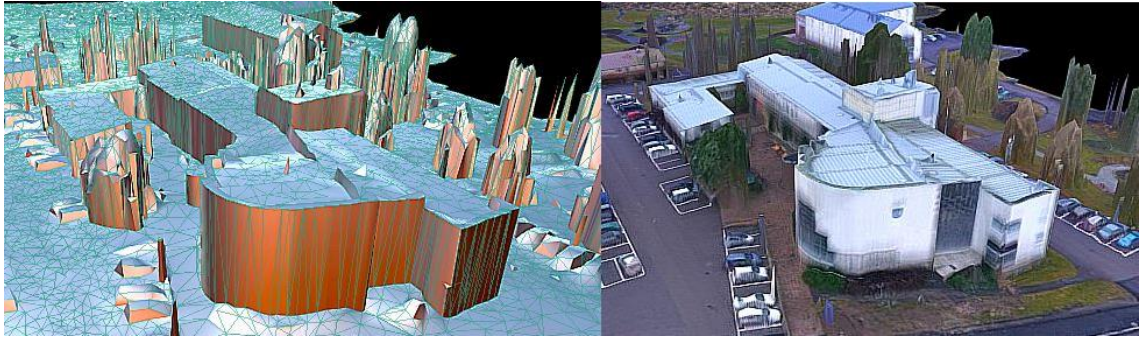
Agisoft Photoscanissa on neljä perustyövaihetta. Työvaiheiden suurimman työn tekee ohjelma automatisoidusti, kuten esimerkiksi kuvien järjestelyn ja 3D-rekonstruktion (Agisoft LCC 2015, V). Isoimmat manuaalisesti tehtävät työt ovat tuki-pisteiden etsiminen ja merkitseminen kuville ja pistepilven luokittelu. Jotta tuotos palvelisi parhaiten sen käyttötarkoitusta, eri työvaiheiden tulosten/tyylien laatua ja tarkkuutta voidaan säädellä lukuisilla eri parametreilla.

Ensimmäisessä työvaiheessa kuvat järjestellään oikeaan järjestykseen. Photoscan määrittelee kuvilta yhteisiä pisteitä ja kuvien asennon. Tuloksena saadaan kuvien asemat ja niin kutsuttu harva pistepilvi. (Agisoft LCC 2015, V.) Toisessa työvaiheessa rakennetaan tiheä pistepilvi. Pilvi rakentuu automaattisesti perustuen kuviin ja niiden asentoon (Agisoft LCC 2015, 13). Pistepilvi voidaan myös luokitella ASPRS:n LIDAR datan standardoituihin pisteluokkiin. Maanpinnanpisteet voidaan luokitella automaattista luokitustyökalua käyttäen, mutta muut luokat on luokiteltava manuaalisesti (Kuvio 11). Lisäksi pistepilven pisteet saavat fotorealistiset värit kuville, joten itse pistepilvikin on varmasti tietyissä tilanteissa oiva tapa esittää kohteita. (Agisoft LCC 2015, 47–48.)

Kolmannessa vaiheessa Photoscan rekonstruoi tiheästä pistepilvestä kolmiulotteisen pintamallin (Agisoft LCC 2015, V). Mikäli pistepilvi on luokiteltu, voidaan mallia luodessa valita halutut pisteluokat mallinnettavaksi ja jättää osa pisteistä huomiotta (Agisoft LCC 2015, 47). Mallia voidaan muokata yksinkertaisilla työkaluilla, kuten rajaa-, poista- ja sulje reiät -toiminnoilla (Agisoft LCC 2015, 48–49). Lisäksi mallin tarkkuutta voidaan pienentää, mikäli tarve vaatii (Agisoft LCC 2015, 49). Tarkempiin korjauksiin tarvitaan erillinen ohjelmisto. Malli voidaan kummin-kin viedä toiseen ohjelmaan ja tuoda se muokattuna takaisin ohjelmaan (Agisoft LCC 2015, 48). Tuettuja tiedostoformaatteja ovat esimerkiksi COLLADA ja Wavefront OBJ (Agisoft LCC 2015, 75).

Neljännessä ja viimeisessä työvaiheessa malli voidaan teksturoida ja ortokuva voidaan tuottaa (Agisoft LCC 2015, V). Teksturoinnissa Photoscan etsii ja rakentaa kuvista mallin päälle värit, jolloin mallista saadaan fotorealistinen (Kuvio 8) (Agisoft LCC 2015, 15).





Kuvio 8. Teksturoimaton ja teksturoitu malli Kalajoen kaupungintalosta

### 3.1.2 GeoDrone X4L -ortokopteri

GeoDrone X4L -ortokopteri (Kuvio 9) on suomalaisen VideoDronen tekemä ortoilmakuvaukseen suunniteltu UAV-kopteri. Kopteri painaa neljä kiloa, sen lentoaika yhdellä akulla on 38 minuuttia ja sillä saa kuvattua enintään 50 hehtaarin alueen. Kopterin lentonopeus on 22 km/h ja sillä voi lentää maksimissaan 8 m/s puhaltavassa tuulessa. (Geotrim Oy 2016.)



Kuvio 9. GeoDrone X4L -ortokopteri ilmassa (VideoDrone Finland 2016)

Kopteriin on kiinnitetty Sonyn 24 megapikselin kamera, jonka on varustettuna 20 millimetrin objektilla. Kamera takaa 150 metrin korkeudessa 3,5 senttimetrin maastoresoluution. (Geotrim Oy 2016.)

Ilmakuvaus on kopterilla varsin yksinkertaista. Kuvausalue, lähtöpaikka ja laskeutumispaikka suunnitellaan DJI:n Ground Station -lennonsuunnitteluohjelmistolla. Lentoa lähtiessä suunnitelma ladataan kopteriin. Kopteri käynnistetään ja nostetaan ilmaan manuaalisesti radio-ohjaimella. Kun lennokki on saatu tarpeeksi korkealle esteiden yläpuolelle, annetaan sille käsky lähteä suunnitellulle kuvausreitille. Kuvauslento on täysin automaattinen. Kun kopteri palaa takaisin kuvauslennolta, se lasketaan maahan manuaalisesti.

Ilmakuvauslennon aikana lennokki tallentaa kuvien lisäksi kameran asennon ja sijaintitiedot. Lennon jälkeen kuvat, niiden koordinaatit ja asennot ladataan lennokista tietokoneelle radiovastaanottimen kautta. Lennokilla voidaan ottaa myös viistokuvia. Viistokuvauksessa kopteria ohjataan täysin manuaalisesti, eikä kopteri tallenna kuvien asentoja ja koordinaatteja (Mäenpää 2015).

### 3.2 Ilmakuvaus- ja mallinnustyön vaiheet

#### 3.2.1 Maastotyöt ja valmistelu

Ennen ilmakuvausta kuvausalueelle mitattiin 21 tukipistettä signaaleineen. Mittaustapana käytettiin verkko-RTK-mittausta, jossa mittalaite tuettiin statiivilla tukipisteelle mittaamaan sijaintiaan noin kahdeksi minuutiksi. Kopterin lentoajasta johtuen alue kuvattiin viidessä eri osassa. Tukipisteet pyrittiin sijoittamaan niin, että niitä sijaitisi jokaisen yksittäisen kuvausalueen reunoilla ja keskivaiheilla. Signaaleina käytettiin perinteisiä ristiksignaaleja ja myös kuviossa 10 esiintyvän mukaisia helposti siirrettäviä pressusta valmistettuja signaaleja.



Kuvio 10. Leican GNSS-paikannin ja signaali

Tukipisteiden määrä tuntui sopivalta, sillä Agisoft itse neuvoa käyttäjän manuaalissaan käyttämään vähintään 10 tukipistettä, jotta ilmakuvat saataisiin georeferoitua tarkasti (Agisoft LLC 2015,5). Koska kaikki ilmakuvat työstettiin ohjelmalla yhtäaikaaisesti yhdessä projektissa, oli ohjelmalla käytössä kaikki 21 tukipistettä sijainnin laskemiseen. Tällöin ei olisi myöskään haitannut, jos jostain syystä pari tukipistettä olisi liikkunut ennen ilmakuvausta.

### 3.2.2 Kuvauslento ja sen suunnittelu

Kuvauslennot suunniteltiin Ground Station -lennonsuunnitteluohjelmistolla. Ohjelmalla rajattiin kuvauslentoalueet niin, että haluttu alue saatiin kuvatuksi ja tukipisteet jäivät alueen sisälle. Tämän jälkeen valittiin lähtö- ja laskeutumispaikka. Lähtö- ja laskeutumispaikan tulee olla mahdollisimman avoin paikka kuvausalueen keskivaiheilta, jotta kopteriin säilyisi varmasti ohjaimen radioyhteys ja ohjaajan näköyhteys (Mäenpää 2015).

Lisäksi säädettiin lentokorkeus, kuvauksen sivu- ja pituuspeitto sekä lentonopeus. Näillä parametreilla ohjelma arvioi lennon keston. Ground Station arvioi lennon aina reilusti yläkanttiin. Todellisuudessa lentoaika saattoi olla jopa kymmenen minuuttia lyhyempi, mitä arvioitu aika. Lentoajan tuli olla alle 38 minuuttia, ettei akku pääsisi tyhjentymään kesken lennon.

Ilmakuvauksen sivu- ja pituuspeittona käytettiin 80 prosenttia. Lentonopeus pidettiin suositellussa 6 m/s (Geotrim Oy 2016). Lentokorkeudessa päädyttiin kokeilujen kautta 70–75 metriin maanpinnasta. Turvallisuussyistä lentokorkeutta nostettiin 75 metriin osalla kuvausalueista, koska alueella sijaitsee 66 m korkea radiomasto.

Kuvauslennot sujuivat ilman suuria ongelmia. Kopteri oli vakaa ja sitä oli helppo ohjata. Ongelmia tuotti ainoastaan Kalajoentien varressa sijaitseva radiomasto, joka aiheutti häiriötä radiolähettimeen. Radiolähettimellä on tarkoitus lähettää kuvauslennon lähtökäsky tietokoneesta ilmassa odottavalle kopterille. Maston läheisyydessä kopteri ei suostunut käskystä huolimatta lähtemään kuvausreitille. Ongelma ratkaistiin siirtämällä lähtöpaikka kauemmaksi mastosta.

### 3.2.3 Mallinnus Agisoft Photoscan Professional -ohjelmistolla

Agisoft Photoscan Professional ohjelmisto osoittautui hyväksi mallinnusohjelmaksi. Ohjelman kaikki perustyövaiheet olivat selkeitä. Missään vaiheessa ohjelman käyttöä en tuntenut hukkuvani ohjelman lukuisten työkalujen määrään, kuten joissakin ohjelmistoissa aloittelijalle saattaa käydä. Lisäksi ohjelmiston käyttäjän manuaali ja Agisoftin internetsivuilta löytyvät tarkemmat ohjeistukset eri tuotoksiin olivat kattavia ja selkeästi kirjoitettuja. Jos apua kysymyksiin ja ongelmiin ei löytynyt manuaalista tai ohjeistuksista, löytyi vastaus Agisoftin internetsivujen keskustelufoorumeilta.

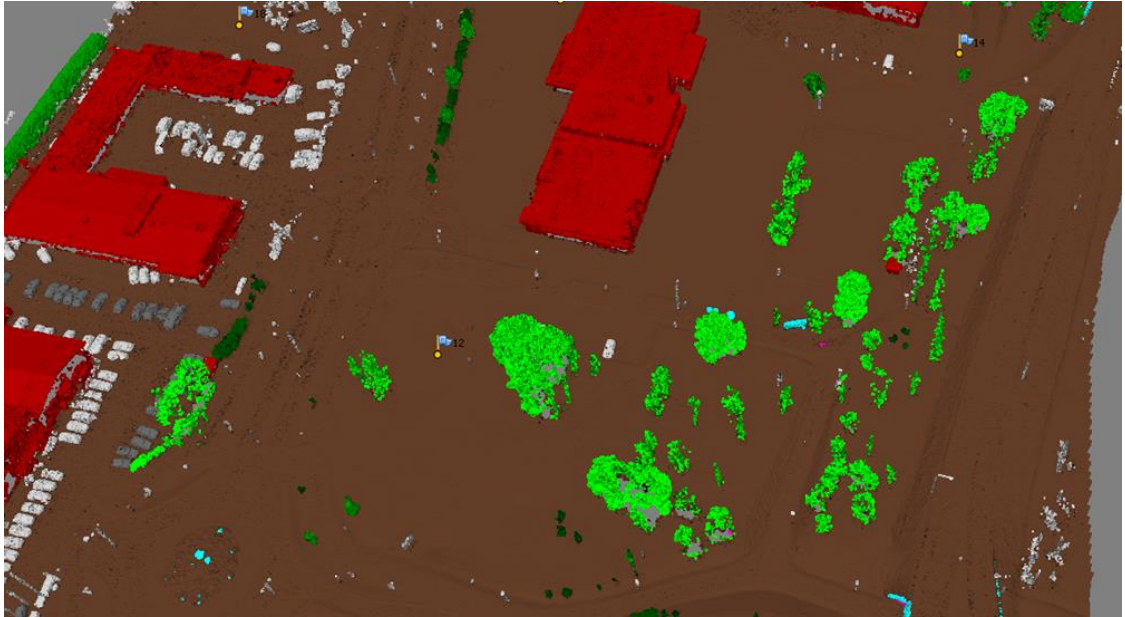
Mallinnustyö eteni verkkaisella vauhdilla. Aikaa veivät oikeiden asetusten löytäminen ja säätäminen. Oikeat säädöt löytyivät manuaalia lukemalla ja kokeilujen kautta. Lisäksi vaiheet, jossa ohjelma käsitteli aineistoa itsenäisesti, saattoivat kestää useita tunteja. Jos tulos ei tyydyttänyt, aloitettiin prosessointi alusta. Joka

työvaiheesta kannattikin tallentaa uusi versio, jotta pieleen menneestä yrityksestä oli sulavaa palata takaisin edelliseen onnistuneeseen työn vaiheeseen.

Työvaiheiden automaattisien prosessien käsittelyaikaan vaikuttavat työprojektin kuvien määrä ja tietokoneen muistin määrä (Photoscan Memory Requirements 2014, 1). Ohjelmiston sulavaan toimimiseen vaikuttavat myös tietokoneen näytönohjaimen ja prosessorin teho. Tässä työssä karttuneen kokemuksen kautta voi todeta, että tehokkaalla kannettavalla on järkevää työstää noin viidensadan kuvan projekteja, suurempiin kuvamääriin olisi suotavaa käyttää vielä tehokkaampaa pöytätietokonetta. Kalajoentien kuvien työstämiseen käytettiin aluksi jokseenkin tehokasta kannettavaa. Tiheän pistepilven tuottaminen, joka käyttää työvaiheista ehkä eniten muistia (Photoscan Memory Requirements 2014, 1), kesti kannettavalla jopa 60 tuntia. Kuvia Kalajoentien projektissa oli yhteensä 2456 sisältäen kaikkien kuvausalueiden kuvat. Lopulta työ päädyttiin tekemään loppuun tehokkaammalla pöytätietokoneella. Työstöajat pienenivät huomattavasti.

Tukipisteiden merkintä kuviin oli yksi manuaalisesti tehtävistä töistä. Ohjelmaan ladattiin tukipisteiden koordinaattitiedot ja ne merkittiin kuville, jossa tukipiste esiintyi. Ohjelma oppi parin pisteen jälkeen missä kaikissa kuvissa sama tukipiste esiintyi ja ehdotti pisteen paikkaa kuvalla. Mitä enemmän tukipisteitä kuville merkitsi, sitä tarkemmin ohjelma osasi ehdottaa pisteiden sijaintia kuvalla. Tukipisteiden merkkäamisen jälkeen ohjelma laski työn virheeksi noin 0,013 m, mikä oli rohkaiseva tieto.

Kuvista saatiin tuotettua jopa kaksisataamiljoonaa pistettä käsittävä pistepilvi. Pistepilven maanpinnan pisteet luokiteltiin automaattista luokitusta käyttäen (Kuvio 11). Lisäksi manuaalisesti luokiteltiin ASPRS:n standardoitujen LIDAR-pisteluokkien mukaisesti rakennukset, virheelliset niin sanotut noise point -pisteet ja osa kasvillisuudesta. Kasvillisuuden luokittelu jätettiin kuitenkin kesken, sillä ajateltiin, että siitä ei olisi jatkoon kannalta kovin suurta hyötyä. Manuaalinen luokittelu vei paljon aikaa, sillä mallinnettava alue oli suuri. Lisäksi poistettiin turhia pisteitä eri menetelmin enimmäkseen mallin reunoilta. Pistepilvi tallennettiin LAS-tiedostomuotoon.



Kuvio 11. Luokiteltua pistepilveä Kalajoentien ympäristöstä

Pistepilvestä rakennettu pintamalli sisälsi yli kymmenenmiljoonaa monikulmioverkoston muodostamaa tahkoa. Mallista tehtiin myös kevyempi versio, jossa tahkojen määrää vähennettiin 500 000:n saakka siihen suunnitellulla ohjelman decimate-työkalulla. Kevennetty malli tehtiin, jotta mallin tiedoston koosta tulisi järkevän kokoinen ja sitä pystyttäisiin käsittelemään myös nettiselaimessa. Liian tarkaksi visuaaliseen esittelyyn tarkoitettua mallia ei kannattanut jättää siitäkään syystä, että myös mallin virheet näkyivät selvemmin tarkemmassa mallissa. Tämä ei olisi välttämättä hyvä mallin visuaalisuuden kannalta. Mallin tarkkuuden vähentäminen pehmensi rosoisuuksia sopivasti. Fotorealististen tekstuurien lisäämisen jälkeen mallit olivat valmiita.

Valmiista mallista selvisi, että kapeat kohteet, esimerkiksi liikennemerkkit ja katulamput eivät mallinnu kunnolla pystysuoraan ylhäältäpäin otetuista ilmakuvista. Kapeista kohteista muodostuu vain ohuita ylöspäin kapenevia piikkejä. Nämä poistettiin mallista suurimmalta osin. Tekstuureja tehdessä todettiin, että mitä matalampi rakennus oli, sitä huonompi oli tekstuurin laatu (Kuvio 12). Kamera ei saa tarpeeksi kuvamateriaalia matalista seinistä. Jos tekstuurien laatua olisi haluttu parantaa, olisi rakennusten julkisivut pitänyt kuvata lisäksi vielä viistokuvauksella. Myös rakennusten seinustan vieressä olevat isot kohteet, kuten puut heikensivät tekstuurin laatua. Kokonaisuudeltaan tekstuurien taso oli kuitenkin tyydyttävää. Työn tuotos kaiken kaikkiaan voidaan arvioida vastaavan CityGML standardin



LOD2-tarkkuustasomääritteitä mallin geometrian osalta, vaikkei malli suoranaisesti sitä ole.



Kuvio 12. Tekstuurien laatueroja matalan ja korkean rakennuksen välillä

Kaikki mallit tallennettiin useissa tiedostoformaateissa tekstuureineen myöhempää käyttöä varten. Lisäksi mallista leikattiin merkittävimpiä rakennuksia yksittäisiksi malleiksi, jotta niitä olisi helpompi hallita eri ohjelmissa ja että ne toimisivat yksittäisinä objekteina. Kokonainen mallihan on muokkaamattomana yksi iso pintamalli eikä välttämättä kovin käytännöllinen. Rakennuksia ja maanpintaa yritettiin ensin erotella pisteluokituksen avulla siten, että mallinnus olisi suoritettu rakennuksien osalta erikseen. Tämä ei kumminkaan onnistunut ohjelmalta halutulla tavalla, vaan ohjelma rakensi kolmioverkolla kaikki rakennukset kiinni toisiinsa.

Kevennetty malli ladattiin Sketchfab-sivustoille. Malli istutettiin myös Kalajoen kaupungin internetsivuille kaupunkilaisten nähtäville (Kuvio 13). Sketchfab on julkaisualusta 3D-sisällölle internetissä, samoin kuin Youtube videoille (Sketchfab 2016a). Alusta tukee 28 eri tiedostoformaattia ja malli voidaan jakaa lähes missä tahansa muussa alustassa, kuten Facebookissa tai omilla nettisivuilla (Sketchfab 2016b).



Kuvio 13. Kalajoentien malli. Linkki malliin on [tässä](#).

Lopuksi aineistosta työstettiin vielä ortokuvaa eri pikselitarkkuuksilla. Tarkimman ortokuvan pikselikoko määriteltiin 2 cm. Ortokuvasta voisi vektoroida esimerkiksi uudistetun Kalajoentien keskilinjat ja tien reunat ja lisätä ne pohjakartalle. Lisäksi pistepilvestä valmistettiin korkeusmalleja eri tiedostomuodoissa. Samoja aineistoja tallennettiin useaan eri muotoon, jotta tulevat suunnittelijat voisivat varmasti käyttää niitä omissa ohjelmissaan.

#### 3.2.4 Työssä kohdattuja ongelmia ja niiden ratkaisuja

Vaikka työ onnistui kokonaisuudessaan hyvin, oli matkassa myös ongelmia. Suurimman osan ongelmista aiheutti varmasti kokemattomuus aiheesta. Tässä kappaleessa käydään läpi merkittävimpiä eteen tulleita ongelmia, joista selvittiin vaihtelevalla menestyksellä.

Ortokopterin lentokorkeutta määritettiin kokeilujen kautta. Aluksi kuvausta kokeiltiin korkeimmasta suositellusta korkeudesta 150 metristä. Kuvien kokeilukäsittelyn yhteydessä havaittiin kumminkin, että rakennusten julkisivujen tekstuurit eivät onnistuneet tarpeeksi hyvin. Ratkaisuksi lentokorkeus laskettiin 70–75 metriin. Tässä vaiheessa täytyy todeta, että omat Photoscan käyttötaitoni olivat vielä varsin vähäiset, joten kokenut ohjelmiston käyttäjä olisi saattanut saada 150m kuvausaineistostakin parempaa laatua. Aikaa oli kumminkin rajoitetusti kuvauslentoille, joten asiaan reagoitiin heti ja lentokorkeutta laskettiin, jotta käytössä olisi varmasti mallinnuskelpoista aineistoa. Lentokorkeuden laskemisen myötä myös lentoalueen koko yhdellä lentokerralla pieneni huomattavasti. Tämän johdosta



mallinnusalueetta päätettiin pienentää realistisemmaksi. Kuvausalueita kavennettiin molemmin puolin Kalajoentietä.

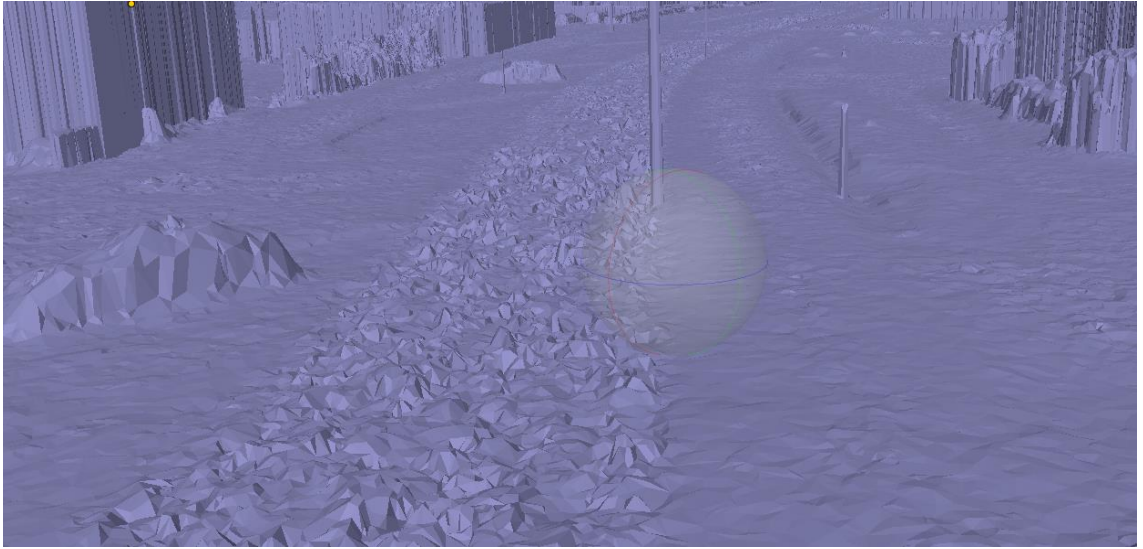
Tiheän pistepilven luonnin jälkeen saatiin parempaa käsitystä siitä, miten ilmakuvaukset onnistuivat. Kokonaiskuva vaikutti hyvältä, mutta isojakin virheitä pistepilvestä paljastui. Esimerkiksi vastakorjatun Kalajoentien kohdalla pisteistö oli erittäin rosoista, eikä se kuvannut tien todellista muotoa. Muutaman rakennuksen katoissa oli samankaltaisia virheellisiä piirteitä (Kuvio 14).



Kuvio 14. Pistepilvessä esiintyviä virheitä rakennusten katoissa ja Kalajoentiessä kuvan oikeassa reunassa

Virheet johtuivat todennäköisesti siitä, että kamera ei saanut kuvauksen aikana tarpeeksi valoa. Koska vasta korjattu Kalajoentie oli kuvauspäivinä toisinaan aamuiselta sateelta märkä, oli sen väritys hyvin tumma. Kosteat pinnat aiheuttivat heijastavuudellaan varmasti oman osansa virheistä. Lisäksi osa kuvauspäivistä olivat pilvisiä eikä päivänvaloa ollut ainakaan liiaksi. Valoisampana päivänä kuvatut alueet onnistuivat paremmin.

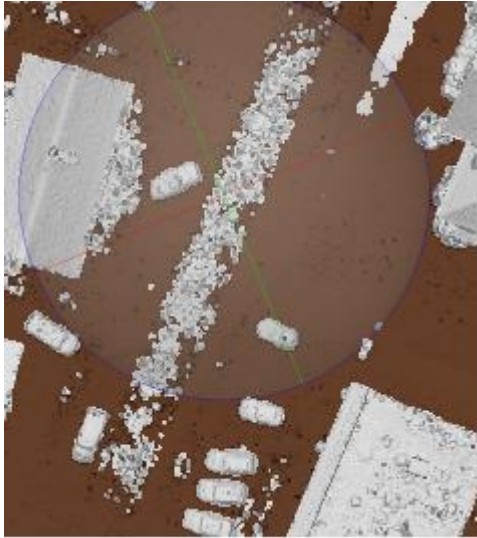
Parempaan kuvaustulokseen olisi ehkä päästy muuttamalla kameran ISO-arvoa suuremmaksi. ISO-arvo kuvaa kameran kennon herkkyyttä valolle (Saari 2015). Toisaalta ISO-arvon kasvattaminen olisi voinut luoda virheitä muille hyvin onnistuneille kohteille. Liika valoherkkyys aiheuttaa kuvalle kohinaa. Kohina esiintyy valokuvissa väärän värisinä pikseleinä ja kirkkauden vaihteluna (Saari 2015). Kirkkaampia säitä ei tiukan aikataulun johdosta ollut mahdollista odottaa.



Kuvio 15. Teksturoimattomaan Kalajoentien malliin muodostunutta rosoista pintaa

Mallia rakentaessa virheelliset pisteet muodostivat malliin rosoista pintaa, syviä reikiä ja korkeita piikkejä (Kuvio 15). Täytyi keksiä keino virheiden poistamiseen ja tehdä malli uudestaan. Osa virheistä saatiin poistettua pistepilven luokittelun yhteydessä. Automaattisen maanpinnan pisteiden luokituksen jälkeen saattoi nähdä selvästi virheelliset alueet pistepilvessä. Maanpinnan pisteiden luokitteluun pystyi vaikuttamaan tietyillä parametreilla, jotka määrittivät, kuinka isoja korkeuseroja tietyn suuruisella alueella pisteiden välillä saattoi olla ja kuinka jyrkkiä kulmia maanpinnan pisteet saattoivat muodostaa keskenään (Agisoft LCC 2015, 47–48). Näin jyrkät nousut, kuten talojen seinät, jäivät pois luokituksesta. Myös Kalajoentiessä olevat virheelliset pisteet ohjelma jätti luokittelematta maanpinnaksi (Kuvio 16).

Photoscan tunnistaa ja luokittelee osan virheellisistä pisteistä ASPRS:n LIDAR datan luokituksen mukaiseen noise point -luokkaan automaattisesti maanpinnan pisteiden luokittelun yhteydessä. Nämä ohjelmiston itse tunnistavat virheelliset pisteet ovat kumminkin hyvin karkeita virheitä, sillä pisteet sijaitsivat aina reilusti useita kymmeniä metrejä pistepilven yläpuolella tai sen alapuolella muusta pisteistöstä. Pienemmän luokan virheelliset pisteet piti luokitella manuaalisesti.



Kuvio 16. Maanpinnan automaattisen luokittelun pisteet ruskealla ja luokattomaksi jääneet pisteet valkoisella

Pistepilvestä 3D-mallia työstäessä virheellisten pisteiden noise point -pisteluokka jätettiin pois prosessista. Vaikka virheellisiä pisteitä oli poistettu ja luokiteltu, ei kaikkia virheitä saatu poistettua. Loput 3D-malliin muodostuneet virheet poistettiin manuaalisesti käyttämällä ohjelman poista-työkalua. Virheellinen kohta poistettiin ensin ja sitten paikalle muodostunut tyhjä reikä täytettiin reikien sulkua -työkalulla. Kaikkia virheitä ei saanut poistettua millään, mutta räikeimmät kohdat korjattiin.

Pitää muistaa, että korjatut alueet eivät enää kuvaa kohteen todellisuutta, ne vain näyttävät siltä. Virheellisiä kohtia ei voi käyttää mittatarkan suunnittelun lähtöaineistona, muuta kuin visuaaliseen esittelyyn. Selvennykseksi virheellisistä alueista tehtiin selvitys aineistojen käyttäjiä varten.

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 4.1 Kalajoen suunta kohti kaupunkimallinnusta

Voidaan todeta, että Kalajoen kaupungilla on hyvät työkalut ja aineistot hankekohtaisen mallin rakentamiseen. Kalajoki kykenee LOD0–LOD1-tasoiseen mallinnukseen varsin vaivattomasti. Infraworksilla saadaan muutettua 2D aineisto kolmiulotteiseksi nopeasti. Tämä on jo hyvä pohja mallinnukselle. Kaupungin kartastoja pidetään ajan tasalla ja niistä voidaan mallintaa tarvittaessa haluttuja alueita kolmiulotteiseen muotoon. Tarkempien mallinnusten tilausta ammattilaisilta voidaan harkita hankekohtaisesti tarpeen mukaan. Pieniä alueita Kalajoki voi mallintaa itsekin.

Kehittääkseen mallinnusvalmiuttaan, Kalajoki voisi harkita, olisiko tarpeellista aloittaa päivitettävien uusien rakennuksien räystäiden ja kattoharjojen korkeuksien kartoitus pohjakartalle. Tämän hetkisten rakennusten kattomuotojen kartoitusta laserkeilauksella voisi myös harkita. Näillä keinoilla saavutettaisiin LOD2-tasoinen mallinnusvalmius pohjakartalle. BIM-mallien keräämistä voisi myös miettiä jollain tasolla. Esimerkiksi isompien ja julkisten rakennusten BIM-malleja voitaisiin pyytää kaupungin käyttöön. Toinen vaihtoehto olisi, että kerättäisiin malleja vain tietyltä sovitulta alueelta.

Isoa kaupungin kattavaa ylläpidettävää kaupunkitietomallia ei Kalajoen mielestäni vielä kannata ruveta rakentamaan, sillä tarvetta tällaiselle kaupunkimallille ei ole vielä Kalajoella omaksuttu. Siirtyminen ylläpidettyyn kaupunkimallinnukseen vaatisi suuria muutoksia kaupungin toimintatavoissa ja lisäkoulutusta aiheesta. Kaupunkimallin ylläpito vaatisi luultavasti myös henkilöstön lisäystä (Taka-Eilola 2016). Näistä syistä kaupunkimallilla olisi riski jäädä vaille tarvittavaa ylläpitoa. Koska kaupunkimallinnuksen kansalliset suunnat ovat vielä määrittämättä, on myös vaara, että Kalajoki lähtisi viemään kaupunkimallinnustaan väärille urille ja tulevaisuudessa mallin ja toimintatapojen yhteensopivuus ei toimisi muiden tahojen kanssa.

Kalajoella on kumminkin kiinnostusta kaupunkimallinnukseen, joten sen kannattaakin hankkia aiheesta lisää tietoa ja seurata asian kehittymistä aktiivisesti. Kau-

pungin on hyvä tutustua tässäkin työssä mainittuihin Liukkosen mallinnuksen ohjeistuksiin ja Yleisiin Inframallivaatimuksiin 2015. Suuret kaupungit tulevat luultavasti näyttämään esimerkillään suuntia siitä, miten kaupunkimalli olisi hyvä toteuttaa. Seminaareihin ja tietoiskuihin osallistumisen lisäksi, päättötöiden järjestäminen aiheesta voisi olla yksi hyvä tapa kartuttaa tietoa. Lisäksi AutoDeskin aiemmin mainittu ohjelmapaketti ei ole laajasti kaupungin käytössä, joten kaupungin kannattaisikin tutustua ohjelmiin tarkemmin ja hankkia niihin lisäperehdytystä.

Hyötyjä mallinnuksesta Kalajoelle on varmasti. Kalajoki voisi käyttää mallinnusta esimerkiksi markkinoinnin välineenä Hiekkasärkkien alueella. Hiekkasärkät on Kalajoen rannalla sijaitseva matkailuun keskittyvä alue. Näkisin mallinnuksella olevan monenlaisia sovellutuksia alueen tarpeisiin. Alueesta voitaisiin esimerkiksi laatia virtuaalinen 3D-kartta, jossa katselija voisi liikkua vapaasti ja tutkailla alueen palvelutarjontaa sekä kauniita rantamaisemia. Malli voisi olla selailtavissa vapaasti käytettävällä isolla kosketusnäytöllä Hiekkasärkkien infopisteellä. Lisäksi se voitaisiin julkaista internetsivuilla.

Toinen hyvä käyttökohde olisi alueella lisääntyvien tuulivoimaloiden ominaisuuksien visualisointi ja analysointi. Tuulivoima jakaa paljon mielipiteitä. 3D-malli alueesta selventäisi varmasti kaupunkilaisten käsitystä, miten voimalat vaikuttavat sen ympäristöön. Mallilla voitaisiin mahdollisesti suorittaa esimerkiksi voimaloiden aiheuttamia melu- ja näkyvyyshaittoja.

## 4.2 Kalajoentien mallinnus

UAV-lennokilla suoritettu ilmakuvauus ja kuvilta mallinnus soveltuu hyvin pienikokoisille alueille, jossa ei ole paljon kasvillisuutta. Mallinnuksesta saatua mallia voidaan luonnehtia CityGML-standardin LOD2-tarkkuustasoa vastaavaksi sen geometrian tarkkuuden ominaisuuksiltaan. Isompien alueiden mallinnus tuottaa käytännön ongelmia esimerkiksi pistepilven manuaalisen luokittelun takia. Ison alueen käsittely vie myös paljon aikaa. Kalajoentien mallinnusalue oli jo vähän turhan suuri aikatauluun nähden. Jos käyttötarkoitus ei vaadi pistepilven luokittelua muiden, kuin maanpinnan pisteiden osalta ja iso könttimäinen pintamalli käy,

voidaan lennokilla mallintaa näinkin isoja alueita. Tällainen yhtenäinen pintamalli voi kumminkin olla moneen käyttötarkoitukseen liian kömpelö. Jotta käytettävyys olisi parempi, yhtenäistä mallia pitäisi muokata jollakin toisella ohjelmalla ja irrotella esimerkiksi rakennukset maanpinnasta erillisiksi kohteiksi. Voi olla, että jokin muu ohjelmisto olisi soveltunut paremmin isompien alueiden käsittelyyn.

Kiiltävät pinnat ja tummat kohteet voivat tuottaa hankaluuksia mallinnettaessa. Sääolosuhteet kuvauslennon aikana vaikuttavatkin merkittävästi mallinnuksen laatuun. Onkin suositeltavaa, että kuvaukset suoritetaan kirkkaalla säällä maanpinnan ollessa kuiva. Mikäli näin olisi ollut tätä työtä tehtäessä, olisi varmasti säästyty karkeimmilta virheiltä.

Työssä huomattiin myös, että matalien rakennusten seinätekstuurit onnistuvat huonommin, mitä korkeiden rakennusten tekstuurit. Mikäli mallin käyttötarkoitus vaatii tarkat julkisivutekstuurit, kannattaa mallinnusaineistoa täydentää viistokuvilla. Mallinnus on hankalaa myös, jos alueella on paljon kasvillisuutta, joka peittää oleellisia kohteita. Näitä kohteita ei saa mallinnettu hyvin.

Mallinnuksen mittatarkkuutta tulisi tarkistaa enemmän. Tämän työn aikana tarkkuutta ei ehditty kunnolla analysoida. Työssä valmistuneen pistepilven osalta verrattiin maanpinnan pisteitä GNSS-mittalaitteella mitattuihin pisteisiin yhdeltä pieneltä alueelta. Näytti siltä, että mittauksien erot pysyivät noin 2 cm:n sisällä (Kattilakoski 2015). Mallinnusta tehdessä havaittiin, että virheet voivat olla hyvinkin paikallisia. Huonosta valotuksesta johtuvan huonosti mallintuvan kohteen vieressä saattoi olla todella hyvin onnistuneita kohteita. Fotogrammetrista pistepilveä tai mallia käyttäessä tuleekin olla tarkkana, mikäli jokin alue tai kohde näyttää omituiselta, sitä ei kannata käyttää suunnittelussa tai mittauksissa.

Kun Kalajoentien mallia vertaa ammattilaisten tekemään malliin, voi olla tyytyväinen työn tulokseen (Liite 2). Liitteessä 2 on kuva Blom kartan valmistamasta kaupunkimallista Tukholman kaupungille. Malli on Blom uutiskirjeen mukaan tuotettu viistoilmakuvista (Tukholma kehittyy kolmiulotteisena 2013). Malli on nähtävillä osoitteessa: <http://blom3d.se/3D/App/?scene=Falkenberg#%2F>. Kalajoentien malli löytyy osoitteesta: <https://sketchfab.com/models/71604bc9e98444018ec83f5abee09ef6/embed/>.

## 5 POHDINTA

Tämä opinnäyte loi kattavan katsauksen kaupunkimallinnukseen, sen ominaisuuksiin ja nykytilaan. Lisäksi tutustuminen UAV-lennokin käyttöön ja mallintamiseen ilmakuvilta loivat hyvän kokonaisuuden opinnäytetyöksi. Opinnäytetyö voidaan katsoa onnistuneeksi, sillä se täyttää kaikki tavoitteensa. Kalajoen kaupunki sai selvityksensä kaupunkimallintamisesta. Kalajoella on nyt käsissään kattava perustieto kaupunkimallinnuksesta ja sen käyttötarkoituksista. Kalajoki tietää millä asteella, millä työkaluilla ja miten sen kannattaa kaupunkiaan mallintaa. Kaupunkimallinnuksen hyödynnyskohteita Kalajoella on useita. Kalajoki pystyy mallintamaan koko kaupunkiaan tarkkuustasolla, joka käy moneen käyttötarkoitukseen. Kaupunki tietää myös, miten tarkempaa aineistoa on mahdollista hankkia tai mallintaa.

Kalajoentien ilmakuvaksesta Kalajoen kaupunki sai hyvän käsityksen UAV-ortokopterin käytöstä kartoituksessa ja sen mahdollisuuksista. Kalajoella on nyt käytössä fotorealistisen 3D-mallin lisäksi muun muassa pistepilviaineistoa ja ortokuva alueesta, joita se voi hyödyntää alueen rakentamisessa, suunnittelussa, visioinnissa ja esimerkiksi vuorovaikutuksessa. Lisäksi Kalajoki voi täydentää tuotetun aineiston avulla ylläpidettävät kartastonsa.

Nyt kokeneempana voin todeta, että Kalajoentien mallinnusalue oli aika suuri. Järkevämpi alueen koko olisi ollut yhden tai kahden kuvauslennon kattava alue näin ensikertalaisille. Työmäärää ja kuvaskopterin ominaisuuksia oli kuitenkin hankala arvioida etukäteen. Pienempi mallinnusalue olisi myös pienentänyt mallinnusohjelmiston prosessointiaikoja. Tavoitteena kuitenkin oli, että Kalajoki hyötyisi oikeasti kokeilusta, joten lähdettiin siitä, että Kalajoentien korjattu osa ja sen ympäristö kaupungin keskustasta olisi hyvä mallinnuskohde.

Kalajoentien ilmakuvauus olisi pitänyt suorittaa valoisammalla säällä. Ongelmana oli se, että ilmakuvauusta ei voinut suorittaa aikaisemmin kesällä siitä syystä, että Kalajoentie oli silloin korjauksen alla. Tällöin olisi malliin ja muihin tuotoksiin talentunut keskeneräinen katu. Kadun korjaus valmistui marraskuun alussa ja kuvauslennot suoritettiin heti sen perään. Myöhempään ilmakuvauksia ei sopinut

jättää, sillä talvi teki jo tuloaan. Kirkkaampi sää olisi taannut vähemmän huonosta valotuksesta johtuvia virheitä. Lisäksi tuotetun aineiston mittatarkkuuksiin olisi voitu keskittyä enemmän. Pienempi mallinnusalue olisi suonut tähän enemmän aikaa.

Opinnäytetyötä voidaan pitää luotettavana, sillä kaikki tieto työhön on hankittu luotettavista alan tieteisartikkeleista, asiantuntijoiden lehtihaastatteluista, ohjelmistovalmistajien omista manuaaleista ja alan asiantuntijoiden pitämistä luennoista. Lähteiden luotettavuutta ja ajantasaisuutta on arvioitu ennen niiden käyttöä. Suurin osa lähteistä on tältä vuosikymmeneltä muutaman vuoden takaa, mikä on tärkeää alan nopean kehittymisen takia. Opinnäytetyön luotettavuutta olisi voitu lisätä kattavilla asiantuntijoiden haastatteluilla, jolloin olisi saatu asioista vahvistusta ja uusin tieto.

Jatkotutkimuksena tälle työlle voisi syventyä tarkemmin semanttista kaupunkimallinnusta harjoittavien kaupunkien mallinnusjärjestelmiin ja toimintatapoihin käytännössä. Tutkimuksessa voisi ottaa konkreettisesti selvää, miten kaupunkimallinnusta nykyään harjoitetaan järjestelmällisesti. Myös eri palveluntarjoajien mallinusratkaisuihin voisi tutustua enemmän. Ilmakuvien käsittelyn osalta voisi kokeilla muita ohjelmia. Voisiko esimerkiksi jokin muu ohjelma osata luokitella fotogrammetrista pistepilveä automaattisesti vielä enemmän? Mallinnuksessa olisi myös hyödyllistä se, että kaikki pisteluokat voitaisiin mallintaa erillisiksi objekteiksi samaan tiedostoon. Lisätutkinnalla voisi myös ottaa selvää, kuinka itse fotogrammetrisesti mallinnettu kaupunkimalli saataisiin muokattua tai muunnettua CityGML standardiksi mahdollisimman automaattisesti suoritettuna.

Työn tekeminen kokonaisuudessaan oli erittäin mielenkiintoista, sillä minulla tai Kalajoen kaupungilla ei ollut aikaisempaa kokemusta UAV-lennokeista, ilmakuvauseineiston jalostamisesta tai kaupunkimallinnuksesta ylipäänsä. Työssä tuli opittua valtava määrä uusia asioita. Ilman tätä työtä edellä mainitut asiat olisivat jääneet oppimatta tai osaan asioista olisi vain teoriapohjainen kosketus koulun penkiltä. Päättötyön ansiosta minulla on nyt hyvä perusosaaminen kaupunkimallinnuksesta. Tiedän mitä kaupunkimallinnus on, kuinka kaupunkimallinnusta voidaan toteuttaa ja minkälaisia hyötyjä siitä saa. Kalajoentien mallintamisesta opin



käyttämään UAV-ortokopteria sujuvasti ja ilmakuvaukseen liittyvät työtehtävät tulivat tutuiksi. Erityisen hyvin opin käyttämään Agisoft Photoscan Professional -ohjelmaa, jolla jouduin tekemään usean työvaiheen toistamiseen oikeiden asetusten löytämiseksi. Työ kehitti myös omia organisointikykyjäni.

Toivon, että tämä päättötyö luo innostusta ja rohkaisee Kalajoen kaupunkia ottamaan kaupunkimallinnusta mukaan kaupungin tulevaisuuden hankkeissa. Toivon myös, että päättötyöni auttaa lukioita oppimaan työssäni kohdatuista ongelmista ja ottamaan niitä huomioon omissa töissään.

## LÄHTEET

Agisoft LCC 2015. Agisoft Photoscan User Manual. Professional Edition, Version 1.2. Viitattu 21.1.2015 [http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_2\\_en.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf)

ASPRS 2016a. What is ASPRS? Viitattu 4.3.2016 <http://www.asprs.org/>

– 2016b. LASer (LAS) File Format Exchange Activities. Viitattu 1.3.2016 <http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>

Autodesk Inc 2016. Infraworks 360. Viitattu 1.2.2016 <http://www.autodesk.com/products/infraworks-360/overview>

Biljecki, F. Stoter, J. Ledoux, H. Zlatanova, S & Çöltekin, A 2015. Applications of 3D City Models: State of the Art Review. ISPRS Journal of Geo-Information 4, 2842–2889. Viitattu 4.2.2016 Doi:10.3390/ijgi4042842

BuildingSMART Finland 2016. Tietomallintamisen yhteistyöfoorumi. Viitattu 28.1.2016 <http://www.buildingsmart.fi/>

BuildingSMART Nordic 2016. buildingSMART Forum Finland. Viitattu 3.2.2016 <http://www.buildingsmartnordic.org/Organisation/finland>

Dölner, J., Kolbe, T.H., Liecke, F., Sgouros, T. & Teichmann, K 2006. The virtual 3d city model of berlin-managing, integrating, and communicating complex urban information. In Proceedings of the 25th Urban Data Management Symposium UDMS (Vol. 2006).

Erving, A. 2008 Paikkatiedoista kaupunkimalleihin: CityGML selvitystyö. Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio. Teknillinen korkeakoulu

Geotrim Oy 2016. GeoDrone X4L. Viitattu 21.1.2016 <http://shop.geotrim.fi/geo-drone-x4l.html>.

Gienow, S. 2014. Full campus scan with octo. Viitattu 16.2.2016

<http://ecosynth.org/profiles/blogs/full-campus-scan-with-octo>

Gröger, G. Kolbe, T. Nagel, C. Häfele, K-H. 2012. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Version 2.0.0

Gröger, G. & Plümer, L. 2012. CityGML-Interoperable semantic 3D city models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 71,12–33

Holopainen, M. 2015. Suomen Kuntaliitto. Kehittämispäällikön luento, FCG:n tietomallinnuskoulutuksessa. Kaupunkien tietomallinnus\_hankinnat 28.10.2015

Hyttinen, S. 2015 FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy. Suunnittelijan luento, FCG:n tietomallinnuskoulutuksessa. Kaupunkien tietomallinnus. Formaattit ja tekniset vaatimukset 28.10.2015

InfraBIM 2016. Inframodel. Viitattu 1.2.2016 <http://www.infrabim.fi/inframodel/>

JUHTA – Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta 2014. JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen.

KAAPPO Kaupunki- Ja Kuntakeskustat Pohjoisessa 2014. Hankesuunnitelma.

Kalajoen kaupunki 2016. Tietoa Kalajoesta. Viitattu 17.3.2016 <http://kalajoki.fi/kaupunki-ja-hallinto/tietoa-kalajoesta/>

Kattilakoski, J. 2015. Kalajoen kaupunki. Mittaustyönjohtajan kanssa käyty puhelinkeskustelu. 11.12.2015

KM3D-hanke 2014. 3D-kaupunkimallikuntakysely. KM3D-hanke. Kuntaliitto. Tehty keväällä 2014

Lammi, H. 2015. Sito Oy. Osastopäällikön (DI) luento SFS-seminaarissa. Kaupunkimallit ja CityGML. Smart cities nyt ja huomenna 14.4.2015. Viitattu 27.1.2016 [http://www.sfs.fi/files/7740/Lammi\\_Kaupunkimallit\\_ja\\_CityGML.pdf](http://www.sfs.fi/files/7740/Lammi_Kaupunkimallit_ja_CityGML.pdf)

Laurila, P. 2008. Kaukokartoituksen perusteet – opetusmoniste. Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

Laurila, P. 2012a. Ilmalaserkeilaus -luentomateriaali. Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

– 2012b. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemen ammattikorkeakoulu. Jyväskylä. Kopijyvä Oy

Laurila, P. 2015. Fotogrammetriset mittaukset -luentomateriaali. Lapin ammattikorkeakoulu.

Liukas, J. & Kemppainen, L. 2015 Yleiset inframallivaatimukset YIV2015. Osa 2. Yleiset mallinnusvaatimukset. Osoitteessa: [http://infrabim.fi/yiv-2015/YIV2015\\_Mallinnusohjeet\\_OSA2\\_Yleiset\\_Vaatimukset\\_V\\_1\\_0.pdf](http://infrabim.fi/yiv-2015/YIV2015_Mallinnusohjeet_OSA2_Yleiset_Vaatimukset_V_1_0.pdf)

Liukkonen, O. 2015. kuntien paikkatiedon polku kantakartasta 3D-kaupunkimalliin. Aalto-yliopisto. Kartografia ja geoinformatiikka. Diplomityö

Maanmittauslaitos 2016. Laserkeilaustekniikka. Viitattu 17.2.2016  
<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/laserkeilausaineistot/laserkeilaustekniikka>

Mäenpää S. 2015. Geotrim Oy. Tuotepäällikön UAV-kopterin käyttökoulutus 4.11.2015

Photoscan Memory Requirements 2014. Viitattu 21.2.2016  
[http://www.agisoft.com/pdf/tips\\_and\\_tricks/PhotoScan\\_Memory\\_Requirements.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/PhotoScan_Memory_Requirements.pdf)

RIL, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto Ry 2016. Tietomallit. Viitattu 28.1.2016  
<http://www.ril.fi/fi/alan-kehittaminen/tietomallinnus.html>

Rönnholm, P. & Haggrén, H 2004. Fotogrammetrian yleiskurssi. Luento10: Optinen 3-D mittaus ja laserkeilaus. Osoitteesta: [http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/301\\_10\\_2004.pdf](http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/301_10_2004.pdf)

Saari M. 2016. Valokuvauksen perusteita: ISO-herkkyys. Viitattu 22.1.2016  
<http://www.mikkosaari.fi/iso-herkkyys/#sanasto>

Salmi, J. 2015. Infra FINBIM vauhditti inframallintamisen läpimurtoa. InfraBIM-Tiedotuslehti 2015, 4.

Salminen, K. 2015. Oulussa kaupunkia rakennetaan inframallien avulla. Infra-BIM-Tiedostuslehti 2015, 14.

Savisalo, A. 2015. Suomen Arkkitehtiliitto SAFA. Johtavan konsultin luento, FCG:n tietomallinnuskoulutuksessa. Johdatus kaupunkimallinnukseen 28.10.2015

Serén, K. 2014. InfraBIM-sanasto. Helsinki. Eurostep Oy. Viitattu 1.2.2016 [http://www.infrabim.fi/wp-content/uploads/2013/10/InfraBIM\\_Sanasto\\_0-7.pdf](http://www.infrabim.fi/wp-content/uploads/2013/10/InfraBIM_Sanasto_0-7.pdf)

Sketchfab 2016a. About Sketchfab. Viitattu 22.1.2016 <https://sketchfab.com/about>

– 2016b. Embed on Web Platforms. Viitattu 22.1.2016 <https://help.sketchfab.com/hc/en-us/articles/203509977-Embed-on-Web-Platforms>

Soukki, K. 2015. Terrasolid. Ratkaisuarkkitehdin luento, FCG: tietomallinnuskoulutuksessa. Kaupunkien tietomallinnus/ Tarpeiden tunnistaminen 28.10.2015

Suomisto, J. 2014. 3D-tietomallit yleistyvät kaupungeissa. Positio 2/2014, 10–12. Kaupunkisuunnitteluvirasto. Viitattu 4.3.2016 [http://www.forumvirium.fi/sites/default/files/fiksu\\_kalasadama\\_12\\_12\\_2013.pdf](http://www.forumvirium.fi/sites/default/files/fiksu_kalasadama_12_12_2013.pdf)

Suomisto, J. 2013. Kaupunkien tietomallit Euroopassa – standardit – teknologia – sovellukset. Luentomateriaali.

Taka-Eilola 2016. Kalajoen kaupunki. Paikkatietoinsinöörin kommentti. 17.3.2016.

Tekla 2012. Kotikortteli Kalasatama. Viitattu 2.3.2016 <http://www.tekla.com/fi/bim-awards-2012/bimmodel11-fi.html>

Trimble Navigation Ltd 2016. Creating 3D from a photo. Viitattu 3.3.2016 <http://help.sketchup.com/en/article/3000115#create-model>

Tukholma kehittyi kolmiulotteisena 2013. Blom uutiskirjeet 3, 2013. Viitattu 4.3.2016 [http://newsletter.blomasa.com/newsletter/2013/September/fi/September\\_fi\\_5.htm](http://newsletter.blomasa.com/newsletter/2013/September/fi/September_fi_5.htm)

Videodrone Finland 2016. Viitattu 22.2.2016

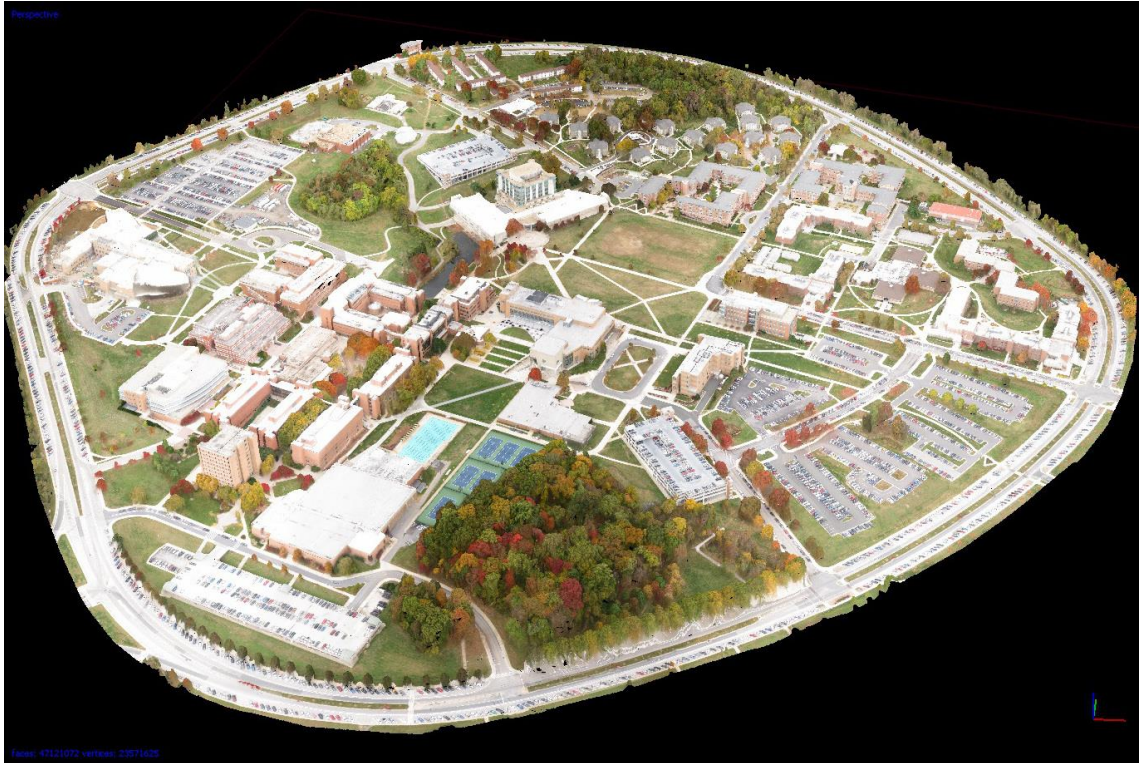
*<http://www.videodrone.fi/images/gallery/X4/DSC00027-001.JPG>*

3D mallinnus uuden asuinalueen suunnittelussa 2014. Blom uutiskirjeet 4, 2014. Viitattu 5.2.2016 [http://newsletter.blomasa.com/newsletter/2014/december/fi/december\\_fi\\_2.htm](http://newsletter.blomasa.com/newsletter/2014/december/fi/december_fi_2.htm)

## LIITTEET

- Liite 1. Kuva Stephen Gienowin tekemästä Marylandin yliopistokampuksen 3D-mallista Yhdysvalloissa.
- Liite 2. Kuva Blom kartta Oy:n valmistamasta Tukholman 3D-mallista.

Liite 1. Stephen Gienowin mallinnus. <https://sketchfab.com/models/733719d35b564814a8e3269b268c2637/embed>.





Liite 2. Blom karttojen Tukholman mallinnus viistokuvilta.

<http://blom3d.se/3D/App/?scene=Falkenberg#%2F>

